

NO_x-reducerende belægninger

Vurdering af rapport fra Photocat om fotokatalytisk belægning på 2 parkeringspladser i Roskilde

Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi

Dato: 4. maj 2018

Steen Solvang Jensen og Thomas Ellermann

Institut for Miljøvidenskab

Rekvirent:

Roskilde Kommune, Bjørn Viinblad Mikkelsen

Antal sider: 28

Faglig kommentering:

Ole Hertel, Institut for Miljøvidenskab

Mikael Skou Andersen, Institut for Miljøvidenskab (kapitel 5)

Kvalitetssikring, DCE:

Vibeke Vestergaard Nielsen



AARHUS
UNIVERSITET

DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Tel.: +45 8715 0000

E-mail: dce@au.dk

<http://dce.au.dk>

Indhold

1	Sammenfatning	5
2	Metode for vurdering af rapport	10
3	Vurdering af NO _x forurening og helbredseffekter	11
4	Vurdering af målinger på 2 parkeringspladser	15
5	Vurdering af eksterne omkostninger og samfundsøkonomisk analyse	24
6	Referencer	27

1 Sammenfatning

Indledning

Roskilde Kommune har bedt Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE) om en faglig vurdering af en rapport udarbejdet af firmaet Photocat. Rapportens titel er "Miljøprojekt med fokus på NO_x-forurening på Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde Parkeringsplads og Bønnelyckes Parkeringsplads". Afslutningsrapport (31/08/2017) (Photocat, 2017). På baggrund af de forhold, som er rejst i nærværende DCE-notat har PhotoCat efterfølgende foretaget visse ændringer i rapporten, og publiceret rapporten under samme titel men med ny dato (15/02/2018).

PhotoCats rapport er udarbejdet for Roskilde Kommune og beskriver et 3-årigt projekt, hvori der indgik et demonstrationsprojekt med Photocats NO_x-OFF overfladebehandling af 5.000 m² parkeringsareal på henholdsvis Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde og Bønnelyckes Plads i Roskilde by. Den NO_x reducerende effekt i belægningsoverfladen er baseret på stoffet TiO₂ (titaniumdioxid), som fungerer som en katalysator, der under påvirkning af lys kan omdanne NO_x til nitrat. Den dannede nitrat formodes at blive udvasket med vejvandet.

NO_x (kvælstofoxider) består af kvælstofdioxid (NO₂) og kvælstofmonoxid (NO), hvor NO₂ er en luftvejsirriterende forureningskomponent. Den største helbredseffekt relateret til luftforurening relaterer sig imidlertid til partikelforurening. NO_x omdannes under transport i atmosfæren til partikulært nitrat i den fine partikelfraktion (PM_{2,5} dvs. massen af partikler med en diameter under 2,5 µm). Denne dannelse af fine partikler sker imidlertid først efter mange timers transport i atmosfæren, og derfor bidrager NO_x ikke til mængden af fine partikler i nærområdet omkring kilderne.

I rapporten forsøger man at illustrere effekten af demonstrationsprojektet. Det gør man blandt andet ved at beregne NO_x-reduktionen pr. m² af det overfladebehandlede areal. På baggrund af den reducerede NO_x-forurening beregnes sparede helbredseffekter. Ud fra disse resultater foretages derefter en samfundsøkonomisk vurdering. I den økonomiske beregning sammenholdes økonomisk gevinst ved sparede helbredseffekter med omkostningerne ved overfladebehandlingen. De samfundsøkonomiske beregninger er gennemført under antagelse af 15 års levetid for overfladebehandlingen NO_x-reducerende virkning. I tillæg til disse beregninger giver rapporten en generel beskrivelse af luftforurening samt den fotokatalytiske teknologi baseret på TiO₂, som NO_x reduktionen er baseret på.

Metode

I stedet for at vurdere faglige udsagn side for side har DCE valgt at gruppere den faglige vurdering af rapporten under tre temaer:

- NO_x-forurening og helbredseffekter
- NO_x-effekt af målinger på 2 parkeringspladser i Roskilde
- Eksterne omkostninger og samfundsøkonomisk analyse

NO_x-forurening og helbredseffekter

Det er ikke korrekt, når Photocat flere steder i rapporten hævder, at luftforureningen er stigende. Faktisk er luftforureningen faldende, når vi ser på danske forhold. I Danmark har det generelle forureningsniveau således været faldende gennem en årrække.

Rapporten hævder endvidere, at der forekommer betragtelige overskrivelser af grænseværdien i tidsrummet kl. 6-18. Det er ikke tilfældet, og udsagnet må bero på en fejlfortolkning af grænseværdierne.

En gennemgående fejl i rapporten relaterer sig til udsagn om, at Roskilde Kommune skulle kunne spare penge, som følge af reducerede helbredseffekter ved fjernelse af NO_x-forurening. Derved hævdes, at fjernelse af NO_x med fotokatalytiske overflader i Roskilde Kommune kan nedsætte omfanget af negative helbredsskader i Roskilde Kommune, og at Roskilde Kommune derved skulle kunne spare penge. De reducerede helbredseffekter man baserer disse beregninger på er imidlertid relaterede til mængden af fine partikler i atmosfæren. For at bidrage til mængden af fine partikler, så skal NO_x gasserne først omdannes til nitratpartikler i atmosfæren. Denne kemiske omdannelse tager tid, og derfor vil helbredseffekterne ikke forekomme inden for Roskilde Kommunes område. Rent faktisk vil langt overparten af de helbredsmæssige gevinster forekomme uden for Danmark dvs. i udlandet. DCE beregninger viser således, at for danske NO_x udledninger forekommer omkring 12% af helbredsomkostningerne i Danmark mens 88% finder sted i udlandet.

Det skal dog bemærkes, at der efterhånden er stigende evidens for en selvstændig helbredseffekt af NO₂, og at denne effekt vil være mere lokal. Der er imidlertid endnu ikke konsensus blandt forskere i Danmark om, hvordan den selvstændige effekt af NO₂ skal beregnes, og ej heller om, hvor stor den er. DCE arbejder på at implementere en direkte effekt af NO₂ ud fra WHO's retningslinjer, men effekterne forventes at være beskedne sammenlignet med effekter relateret til partikelforurening. Det er dog de færreste studier af effekten af fotokatalytiske overflader, der rapporterer om reduktion i NO₂.

Ud over omdannelse af NO_x til nitrat nævner andre studier også dannelse af problematiske reaktionsprodukter som fx salpetersyrling (HONO) og formaldehyd (HCHO) (Monks et al. 2016), som kan have større indvirkning på atmosfærens kemi samt have helbredsskadelige virkninger. Disse forhold er langt fra fuldt ud belyst på nuværende tidspunkt.

NO_x-effekt af målinger på 2 parkeringspladser i Roskilde

In situ (felt) målingerne af fjernelsen af NO_x på de 2 parkeringspladser ser ud til at virke fint. De er gennemført med et setup, som primært har til hensigt at bestemme overfladebelægningens evne til at reducere NO_x. Der er dog en række udfordringer ved målingerne, som der burde have været taget højde for, hvilket er uddybet i kapitel 4.

Det er ikke altid klart om rapporten afrapporterer NO_x eller NO, og rapporten afrapporterer slet ikke NO₂. Der er heller ikke gennemført målinger af NO₂ i luften fx i 1,5 m højde, så rapporten belyser ikke om NO_x-reduktion ved overfladen rent faktisk fører til mindre NO₂ i luften.

Photocat har selv konkluderet, at den fotokatalytiske aktivitet er uændret gennem 15 år. DCE vurderer imidlertid på basis af Photocats egne resultater i rapporten, at der er en reduktion i aktiviteten på 10-20% i løbet af en periode på 1 år. Evnen til at fjerne NO_x over en længere årrække er derfor væsentligt lavere end Photocat vurderer, og det er ikke i rapporten dokumenteret, at

holdbarheden skulle være 15 år, som er den periode Photocat forudsætter i de efterfølgende samfundsøkonomiske beregninger.

Holdbarheden er en meget vigtig faktor i den efterfølgende samfundsøkonomiske analyse, da en forudsætning om lang holdbarhed giver bedre samfundsøkonomi sammenlignet med en kortere holdbarhed.

Ud fra de udførte målinger beregner Photocat en NO_x reduktion på 69 kg om året for de 2 parkeringspladser, som til sammen udgør 5.000 m². Photocat forholder sig ikke til skyggeeffekten af holdende biler, som formodes at reducere potentialet for NO_x-reduktionen.

Det beregnede potentiale på 69 kg NO_x om året kan relateres til eksempelvis NO_x-udledningen fra en gennemsnitsbus i 2015. Den sparede NO_x for 5.000 m² appliceret fotokatalytisk overflade svarer til omkring 15% af NO_x-udledningerne fra en enkelt bus pr. år.

NO_x-effekt i andre danske og internationale studier

Ud over det demonstrationsprojekt, som er gennemført i Roskilde, er der tre andre danske demonstrationsprojekter. Det drejer sig om et demonstrationsprojekt, som Photocat har udført i Københavns Lufthavn med NO_xOFF teknologi, et EU projekt under ledelse af Teknologisk Institut af effekten af NO_x-reducerende overflader langs Fælledvej i København og Holbækmotorvejen nær Brøndby (Light2Cat), samt et demonstrationsforsøg på Gasværksvej i København med bl.a. deltagelse af Teknologisk Institut.

Studiet på Gasværksvej i København er det eneste danske studie, som er af-rapporteret i en videnskabelig artikel. Dette studie fandt ikke en signifikant forskel på NO₂ målte koncentrationer i gaderummet mellem arealet med fotokatalytisk overflade og det uden. Studiet viste en maksimal månedlig reduktion af NO på 22% ved sommertidspunkt, men oplyser desværre ikke den gennemsnitlige NO reduktion over et helt år, selvom det er målt, som vil være væsentlig mindre pga. mindre lysintensitet i vinterhalvåret. Observerede reduktioner af NO_x (NO og NO₂) var derfor drevet af reduktion af NO, da NO₂ ikke ændrede sig signifikant (Folli et al., 2015).

Demonstrationsprojektet ved Københavns Lufthavn viste en gennemsnitlig NO_x-reduktion på 13% i en meget lysintensiv periode fra maj til juli, hvilket må anses for at være lavere, hvis et helt år var inddraget pga. den mørkere vinterperiode med lavere lysintensitet.

I demonstrationsprojektet ved Holbækmotorvejen nær Brøndby blev der rapporteret reduktioner af NO, NO₂ og NO_x i forskellige klasser af lysintensitet, men gennemsnitsværdier er ikke opgivet. I modsætning til de andre studier, finder dette studie en reduktion af NO₂, som tilskrives særlige egenskaber ved Light2Cat fotokatalysatoren (Poulsen et al., 2016).

Det eksperimentelle setup for Fælledvej var problematisk, da man ikke kan forvente at kunne isolere effekten af TiO₂-belægningen ud fra dette eksperimentelle setup, da der er forskelle i trafik, meteorologi og baggrundsforurening i de to halvår forsøget kørte. DCE anser det derfor ikke som et validt studie.

Et internationalt review-studie fra 2016 er meget kritisk overfor fotokatalytiske overflader som et virkemiddel til at forbedre luftkvaliteten. Studiet ændrer en effekt under laboratorieforhold, men under feltforhold vurderes effekten for NO_x og NO₂ meget begrænset (Monks et al., 2016)

Eksterne omkostninger og samfundsøkonomisk analyse

En væsentlig anke mod de fremlagte samfundsøkonomiske analyser er, at Photocat har antaget at den fotokatalytiske effekt er uændret i en periode på 15 år, hvilket ikke er begrundet i rapporten. Denne vurdering er i modstrid med resultater præsenteret i rapporten. Disse resultater viser snarere at effekten af NO_xOFF reduceres 10-20% efter bare et år.

Hvis man eksempelvis regner med en reduktion i den fotokatalytiske aktivitet på 10% om året vil man kun opnå lidt over halvdelen af den mængde, som Photocat beregner fjernet over en periode på 15 år. Dette har væsentlig indvirkning på om tiltaget er samfundsøkonomisk rentabelt.

Der er derfor ikke belæg for konklusionen om, at NO_xOFF skulle kunne fjerne 1.500.000 kg NO_x i løbet af en 30-årig periode med anvendelse af 1-2% af Roskilde kommunes årlige øremærkede midler til udvikling af byens infrastruktur, hvilket svarer til hhv. 3,7 og 7,5 mio. kr.

Det er endvidere ikke korrekt, når Photocat konkluderer, at Roskilde kommune kan opnå besparelser på deres helbredsomkostninger ved anvendelse af fotokatalytiske overflader. Dette hænger sammen med, at det ikke er udledningen af de primære NO_x-gasser, der giver anledning til de beregnede helbredsomkostninger, men derimod de sekundært dannede partikler. Denne omdannelse fra gasser til partikler tager en vis tid, så derfor falder helbredsomkostningerne fra udledning af NO_x i Roskilde kommune uden for kommunens grænser.

I scenarierne (worst, base, best) beregner Photocat de samfundsøkonomiske omkostninger *med* tilbagediskontering, hvilket også er normal praksis. Men med hensyn til opgivelse af tilbagebetalingstider angives disse *uden* tilbagediskontering. I worst case scenariet angiver Photocat eksempelvis selv et samfundsøkonomisk tab på 0,5 kr./m² dvs. investeringen er ikke tilbagebetalt over 15 år, men skriver så, at hvis man ser bort fra tilbagediskontering er tilbagebetalingstiden 10 år.

I august 2017 offentliggjorde Finansministeriet en revideret og opdateret udgave af Vejledning i Samfundsøkonomiske Konsekvensvurderinger (Finansministeriet, 2017). Den samfundsøkonomiske analyse i Photocats rapport benytter derfor tidligere vejledninger. Det kræver nye beregninger for at belyse, hvordan nye forudsætninger i vejledningen vil påvirke de samfundsøkonomiske analyser, som er opstillet i Photocats rapport.

I forbindelse med den reviderede vejledning har Finansministeriet også opskrevet værdien af statistisk liv, således at denne værdi nu er 32 mio. kr. (2017-priser). Dette har også betydning for beregning af enhedsprisen for NO_x (kr. pr. udledt kg. NO_x). DCE er ved at implementere disse nye forudsætninger i det beregningssystem, som ligger til grund for beregning af enhedspriser. Dette forventes at gøre enhedsprisen for NO_x omkring en halv gang større. Dette vil alt andet lige forbedre rentabiliteten i de samfundsøkonomiske analyser.

Samlet set

Rapporten er i udbredt omfang præget af faktuelle fejl, fejl i tolkninger af referencer og misforståelser omkring luftforureningsproblematikken, hvilket bl.a. fører til fejltolkninger og misvisende konklusioner.

2 Metode for vurdering af rapport

I det følgende beskrives kort den metode, som DCE har anvendt i den faglige vurdering af rapporten.

I stedet for at vurdere faglige udsagn side for side er det valgt at gruppere den faglige vurdering af rapporten under tre temaer:

- NO_x-forurening og helbredseffekter
- NO_x-effekt af målinger på 2 parkeringspladser i Roskilde
- Eksterne omkostninger og samfundsøkonomisk analyse

Vi har ikke foretaget en vurdering af selve den fotokatalytiske teknologi som sådan, men alene dens betydning i form af NO_x-reduktion i det pågældende demonstrationsforsøg i Roskilde.

Rapporten har en litteraturliste med 55 referencer. Det har ikke været muligt inden for projektets ramme at vurdere, hvorvidt rapportens faglige udsagn for hver enkelt reference er berettigede. Vi har tjekket faglige udsagn med reference til DCE rapporter og ud fra ekspertviden om luftforureningen i Danmark. Endvidere har vi tjekket faglige udsagn omkring de tre øvrige demonstrationsprojekter, som har været gennemført i Danmark. Det drejer sig om et demonstrationsprojekt, som Photocat har udført i Københavns Lufthavn med NO_xOFF teknologi, et EU-projekt under ledelse af Teknologisk Institut om effekten af NO_x reducerende overflader langs Holbækmotorvejen nær Brøndby og Fælledvej i København samt et projekt som Teknologisk Institut har deltaget i på Gasværksvej i København. Vi har endvidere inddraget konklusionerne fra et omfattende internationalt review fra 2016 af NO_x-reducerende belægninger generelt udført af en luftkvalitets ekspertgruppe under Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra) i Storbritanien. Det har imidlertid ikke været muligt inden for projektets rammer at foretage et egentligt review af den internationale litteratur.

I forhold til den samfundsøkonomiske analyse foretager DCE ikke en vurdering af alle forudsætninger omkring den samfundsøkonomiske analyse. DCE har fokus på de forudsætninger, som vedrører de eksterne omkostninger for NO_x relateret til helbredsomkostninger, hvor der henvises til data, som stammer fra DCE, samt de spørgsmål som gennemgangen af demonstrationsforsøget i Roskilde giver anledning til, og som har betydning for den samfundsøkonomiske analyse.

Dele af rapporten har marketingkarakter med beskrivelse af egenskaber for Photocats NO_xOFF overfladeprodukt i forhold til andre lignende produkter, og hvordan Roskilde Kommune kunne bruge produktet som del af en miljøstrategi. DCE's faglige vurdering omhandler ikke disse områder.

3 Vurdering af NO_x-forurening og helbredseffekter

Photocats rapport giver i kapitel 2 til 5 en gennemgang af baggrunden for at udvikle og anvende en teknik til fjernelse af kvælstofilter (NO_x) fra luften. De præsenterer information om luftkvaliteten i Danmark, om helbredseffekterne af luftforureningen, og de samfundsøkonomiske eksterne omkostninger af luftforureningen. Endvidere forklares hvordan de fotokatalytiske overflader nedbryder kvælstofilter i luften. Afsnittene har specielt fokus på luftforureningen med kvælstofilter og Roskilde Kommune.

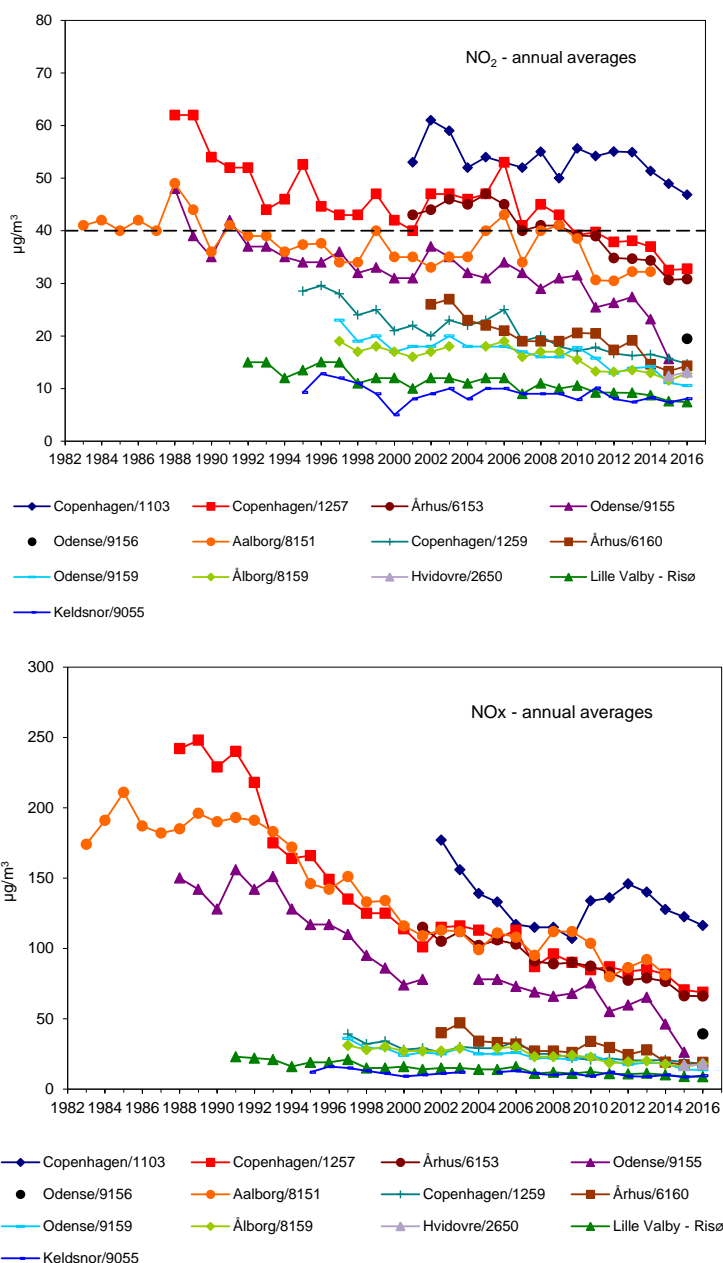
Desværre er kapitlerne i stort omfang præget af faktuelle fejl, fejl i tolkninger af referencer og misforståelser omkring luftforureningsproblematikken, hvilket bl.a. fører til fejltolkninger og misvisende konklusioner. I det følgende vil vi underbygge denne vurdering ved at give en række eksempler på disse fejl. Vi har lagt vægt på de eksempler, som viser problemerne med de konklusioner, som Photocat har skrevet i konklusionen (Kapitel 8).

3.1 Udvikling i luftkvaliteten

I indledning til konklusionen (side 63) skriver Photocat: *"I dette projekt har Photocat sammen med Roskilde Kommune dokumenteret en ny løsning til at afhjælpe den stigende luftforurening i byrummet"*.

Der foretages ikke målinger af luftforureningen i Roskilde, men det gøres i København, Odense, Aarhus og Aalborg. I alle disse byer viser målingerne at luftforureningen generelt er faldende (Ellermann et al., 2017). I figur 3.1 illustreres dette ved udviklingstendensen for NO₂ og NO_x, som for alle målingerne i byerne er aftagende, og ikke stigende som Photocat hævder.

Figur 3.1. Udviklingstendens for NO₂ og NO_x ved målestationerne i delprogram for luft under NO-VANA (Ellermann et al., 2017).



3.2 Udvikling i NO_x-emissionerne

På side 15 nederst skriver Photocat om udviklingen i emissionerne i Danmark: "Kigger man isoleret på NO_x emissionerne udgjorde disse i 1990 omkring 300 ktons, hvilket i dag er estimeret til at være faldet med 65,5%. Sættes denne beregning i relief til den ovennævnte usikkerhedsmargin på 62% er der således en reel statistisk sandsynlighed for, at NO_x emissionerne kun er faldet med 3,5%".

Tallene stammer fra Tabel 1.2 i Nielsen et al. (2017; side 27), men de er ikke korrekt aflæst. Af tabellen fremgår, at usikkerheden på de årlige NO_x-emissioner er 53%, mens trenden for NO_x-emissionen er på -62% i perioden fra 1990-2015. Tabellen angiver endvidere usikkerheden til 9%-point, hvilket skal opfattes således, at trenden er $-(62 \pm 9)\%$. Der er derfor ikke tvivl om, at emissionerne er faldet kraftigt, hvilket gælder i Danmark og de fleste af de øvrige EU-lande. Det er dette fald i NO_x-udledningerne, som er årsagen til faldet i de målte koncentrationer (se Figur 3.1).

3.3 Relation til grænseværdier

Når det gælder vurderingen af luftkoncentrationerne af NO_x i forhold til EU's grænseværdier, så formulerer Photocat sig forkert flere steder i rapporten. Et eksempel på dette er på side 30 nederst, hvor Photocat skriver: *"Ovenstående verificerer hypotesen om, at den eksisterende NO_x forurening er størst i dagtimerne, da denne er relateret til befolkningens bevægelses- og adfærdsmønstre. Der synes derfor at være belæg for at konkludere, at størstedelen af NO_x-forureningen er i tidsrummet mellem kl. 06.00 og kl. 18.00 og at der i dette tidsrum forekommer betragtelige koncentrationer langt over EU's fastsatte grænseværdier"*.

Der er to væsentlige faktuelle fejl i ovenstående. For det første omhandler teksten NO_x-forureningen, mens grænseværdierne i EU's luftkvalitetsdirektiv, som Danmark skal overholde, udelukkende omhandler NO₂, når det gælder helbredseffekter. For det andet angiver teksten, at der forekommer betragtelige koncentrationer langt over grænseværdien. Det nævnes ikke i teksten, hvilken grænseværdi der henvises til, men baseret på den øvrige tekst i afsnittet og figur 19 i rapporten, må dette være NO₂-grænseværdien på 40 µg/m³, der er tale om. Denne grænseværdi gælder for årsmiddelværdien i et kalenderår. Det sker stort set dagligt, at timemiddelkoncentrationerne i gaderum overskrider de 40 µg/m³ i morgenmyldretiden, men det fører ikke til en overskridelse af grænseværdien. Det sker først, når årsmiddelværdien for NO₂ i et kalenderår overskrider de 40 µg/m³. Grænseværdien er kun overskredet på H.C. Andersens Boulevard i København, som er Danmarks mest befærdede bygade (Ellermann et al., 2017).

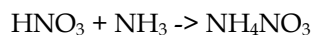
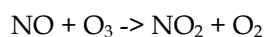
For NO₂ er EU-grænseværdien for beskyttelse af mennesker på 200 µg/m³, som kun må overskrides 18 gange pr. år som timeværdi. Denne grænseværdi er heller ikke overskrevet selv på H.C. Andersens Boulevard (Ellerman et al., 2017).

Gennem EU's luftkvalitetsdirektiv er der fastlagt en grænseværdi til beskyttelse af vegetation mod skadelige effekter relateret til NO_x. Grænseværdien er gældende uden for bymæssige områder og er på 30 µg/m³ som årsmiddelværdi. DCE beregninger viser, at der ingen overskridelser var i Danmark i 2015 (Ellermann et al. 2016).

3.4 Helbredsskader i Roskilde Kommune

En gennemgående fejl i rapporten er endvidere, at fjernelse af NO_x med fotokatalytiske overflader i Roskilde Kommune kan nedsætte omfanget af negative helbredsskader i Roskilde Kommune relateret til luftforurening, og at Roskilde kommune skulle kunne spare penge. Et eksempel er, at Photocat skriver i konklusionen på side 63: *"Roskilde Kommune vil dermed kunne opnå en økonomisk gevinst på 7,3 kr. per m², som de applicerer med NO_xOFF i teknologiens levetid"*.

Ovenstående citat er forkert, fordi udledninger af NO_x i Roskilde Kommune kun i meget lille omfang påvirker helbredet for borgere i Roskilde Kommune. Dette hænger sammen med, at med den viden der foreligger konsensus om i dag, så relaterer mere end 90% af helbredseffekterne sig til de fine partikler betegnet PM_{2.5} (Ellermann et al., 2017). Det er korrekt, at udledninger af NO_x medfører negative helbredseffekter, men de mest væsentlige helbredseffekter er relateret til partikelforurening, som først dannes, når NO_x-gasserne i en række trin er blevet omdannet til partikelform (ammoniumnitrat, NH₄HNO₃):



Dannelse af de såkaldte sekundære partikler ud fra NO_x (primære udledning) sker typisk med 5% i timen i dagtimerne (Hertel, 2017), mens det går meget langsommere om natten. Derfor er den i Roskilde udledte NO_x blæst ud af byen inden partiklerne er dannet, idet den gennemsnitlige vind blæser med omkring 20 km i timen. De 64 præmature dødsfald i Roskilde Kommune, som Photocat nævner på side 63 (reference til Jensen et al., 2014), stammer derfor ikke fra udledninger af NO_x i Roskilde Kommune, og Roskilde Kommune har derfor ikke væsentlig reduktion i helbredseffekterne som følge af brug af NO_xOFF i Roskilde. Det skal dog bemærkes, at der efterhånden er stigende evidens for en selvstændig helbredseffekt af NO_2 , som vil være mere lokal. Der er imidlertid endnu ikke konsensus blandt forskerne i Danmark om, hvordan den selvstændige effekt af NO_2 skal beregnes og ej heller om, hvor stor den er.

Photocat illustrerer i figur 5 de samfundsmæssige omkostninger relateret til NO_x . De to første udsagn i den venstre del af figuren er korrekte og i øvrigt korrekt refereret til Brandt et al. (2016). Men det er ikke korrekt, at NO_x -forureningen totalt koster Danmark 19 mia. kr. om året. Brandt et al. (2016; tabel 2.2) angiver, at de danske udledninger af NO_x koster de Europæiske lande (inklusiv Danmark) omkring 17 mia. kr., hvoraf de omkring 2 mia. kr. skyldes helbredsskader i Danmark som følge af udledninger i Danmark. Dvs. 12% af helbredsomkostningerne forekommer derfor i Danmark og 88% i udlandet.

3.5 Tidsmæssig kobling mellem NO_x -udledning og helbredseffekter

Photocat argumenterer i kapitel 5 (side 31) endvidere for følgende: *"Teknologien reducerer NO_x forureningen, når trafikken og den udendørs færdsel er på sit højeste og dermed når luftforureningen påfører de største sundhedsmæssige skader og som følge heraf øger de samfundsmæssige omkostninger relateret til luftforureningen"*.

Denne kobling mellem tidspunkterne for udledningerne og de helbredsmæssige skader er ikke korrekt. Dels fordi der, som vist ovenfor, først skal dannes sekundære partikler. Dels fordi de helbredsmæssige skader, som følge af de fine partikler (som ammoniumnitrat er en del af), optræder som følge af en langtidseksponering, og ikke som akut udsættelse for luftforureningen (Brandt et al., 2016).

3.6 Mulige sideeffekter

Andre kilder nævner dannelse af andre problematiske reaktionsprodukter som fx salpetersyrling (HONO) og formaldehyd (HCHO) (Monks et al. 2016), som kan have større indvirkning på atmosfærens kemi samt have helbreds-skadelige virkninger.

Endvidere savnes dokumentation for, at selve applikationsvæsken ikke giver "bivirkninger" ved anvendelse igennem en lang årrække på større områder.

4 Vurdering af målinger på 2 parkeringspladser i Roskilde

I dette kapitel vurderer DCE de udførte målinger på 2 parkeringspladser i Roskilde. Endvidere opsummeres resultaterne fra 3 andre danske demonstrationsforsøg, som har undersøgt effekten af fotokatalytiske overflader samt konklusionerne fra et internationalt review.

4.1 Effekt på luftkvaliteten i Roskilde

Photocat bestemmer effekten af applicering af katalysatoren ved hjælp af in situ målinger, som måler, hvor meget NO_x den katalytiske overflade fjerner. Disse målinger angiver ikke, hvorvidt luftkvaliteten i Roskilde bliver forbedret. Photocat skriver i konklusionen (side 64): *"Det kan på denne baggrund konkluderes, at den fotokatalytiske teknologi er et konkret og økonomisk rentabelt instrument til at rense luften i byrummet"*. Dette udsagn er ikke underbygget af rapporten, da der ikke foretages målinger af, hvorvidt luften er blevet renere, og om den helbredsskadelige NO_2 faktisk er reduceret.

4.2 Vurdering af målingerne på parkeringspladserne

In situ målingerne af fjernelsen af NO_x ser ud til at virke fint. Der er dog en række udfordringer, som der burde have været taget højde for:

- Ved målinger under ambient lys bliver den faktiske lysmængde ikke bestemt. Der er i hvert fald for en række af de præsenterede forsøg kun angivet en øvre grænse for lysmængden. Fjernelse af NO_x er afhængigt af lysmængden. Det betyder for eksempel, at man ikke ved, hvad den faktiske lysmængde har været for de to sidste målinger præsenteret i tabel 2. Derfor kan man på basis af disse to målinger ikke konkludere: *"at den fotokatalytiske reaktion er uafhængig af startkoncentration og giver sammenlignelige reaktions og gammakoefficienter"* (side 48).
- Temperaturen under målingerne angives ikke i rapporten. Kemiske reaktioner er som oftest afhængigt af temperaturen og gamma er afhængigt af temperaturen. Temperatur er derfor vigtig ved sammenligning af målinger på forskellige årstider.
- Det er ikke altid klart, om der måles NO eller NO_x ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$). Dette gælder for eksempel for figur 25 og 26, hvor der står NO_x i figurteksten, mens der står NO på y-aksen. Et andet eksempel er beskrivelsen af forsøgsparametre på side 41, hvor der kun angives startkoncentration af NO for målinger og ambient luft. Da den katalytiske reaktion foregår i to trin og både skal fjerne NO og NO_2 er det vigtigt, at der altid måles på NO_x og ikke kun NO . Rapporten afrapporterer ikke resultater for NO_2 .
- Ved målinger af fjernelse af NO_x i udeluften (ambient luft, figur 41) mangler der parallelle målinger af koncentrationen af NO_x . Photocats egne målinger af NO_x (figur 39) viser, at der kan være meget store

fluktuationer i koncentrationen i den periode, hvor målingerne foregår. Når man ikke kender koncentrationen af NO_x i udeluften, kan man ikke vurdere, hvor meget NO_x katalysatoren reelt fjerner.

4.3 Holdbarhed af fotokatalytisk effekt

Et afgørende punkt i forbindelse med vurdering af rentabilitet af anvendelse af NO_xOFF er holdbarheden af den katalytiske effekt. Photocat undersøger dette på to måder:

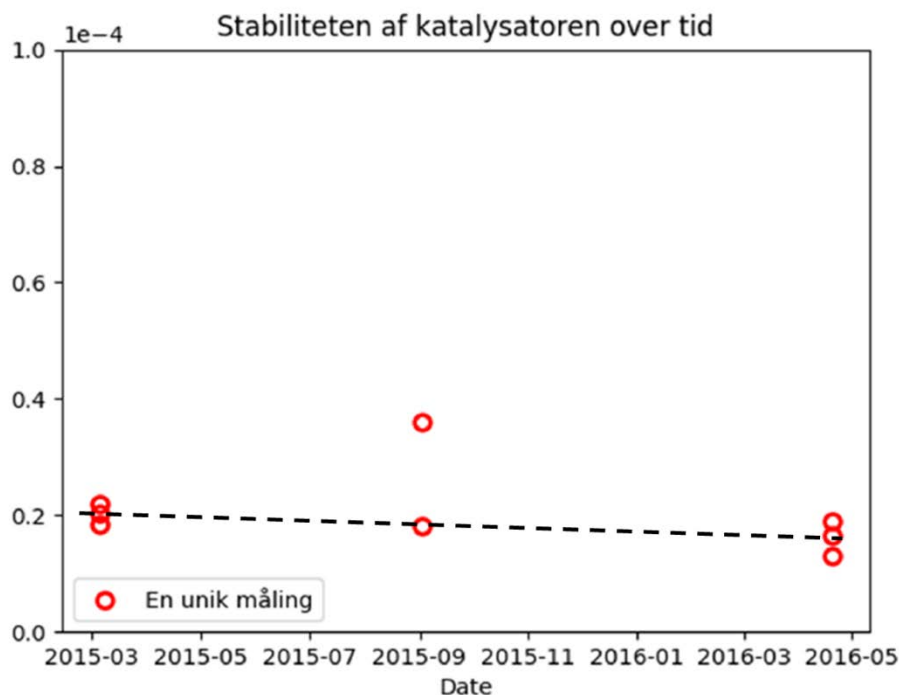
- Via laboratorietest, hvor applikationen af produktet på asfaltprøver udsættes for en accelereret slitage.
- Via in situ målinger på de to parkeringspladser i Roskilde gennem en to-årig periode.

Det er positivt med anvendelse af to forskellige test. Resultaterne fra de to test sammenholdes imidlertid ikke. På basis af det, der er præsenteret i rapporten, er der imidlertid ikke sammenhæng mellem de viste resultater, og de konklusioner som drages. Dette begrundes i de følgende to afsnit.

Figur 27 viser resultaterne af laboratorietest med accelereret slitage. Efter 600 timer, svarende til to års slitage, ses et fald på omkring 10% i fjernelsen af NO_x. Men efter 300 timer, svarende til et års slitage, ses et fald på omkring 16-17%. Konklusionen på disse undersøgelser af effekt af slitage bør derfor være, at der ses en ændring i fjernelsen af NO_x på 10-17% i løbet af 1-2 år. Photocat selv konkluderer: *"Efter ca. 600 timer eller 2 år i reel tid er NO_x aktiviteten stadig høj og et lille fald på 10 % kan observeres"* (side 38 og konklusionen side 63). Denne konklusion er ikke korrekt set i lyset af de resultater, som vises i figur 27.

Resultaterne fra in situ målinger af aktiviteten af katalysatoren over en toårig periode præsenteres i afsnit 6.6.4. Aktiviteten vurderes på basis af den beregnede uptake koefficient. Photocats konklusion er: *"I løbet af et år forandrer katalysatoren sig minimalt på femte decimalen"*. Endvidere skriver Photocat: *"Holdbarhedsdata fra figur 42 viser, at over måleperioden på ca. to år, hvor parkeringspladserne siden appliceringen i september 2014, bl.a. har gennemgået to fulde vintre med sne, snerydning og saltning, kan det konkluderes, at aktiviteten af NO_xOFF behandlingen er intakt"*. Figur 42 præsenterer data fra marts 2015 til april 2016. Det er vores vurdering, at disse resultater viser et fald i aktiviteten af NO_xOFF behandlingen på omkring 20% i løbet af det år, hvor data præsenteres i figur 42. Data i figur 42 er derfor i modstrid med Photocats egne konklusioner.

Figur 4.1. Kopi af figur 42 fra Photocats rapport, som viser uptake koefficienten som funktion af tid i Roskilde Kommune projektet. Den stiplede linje er ikke en del af Photocats figur. DCE har indsat den stiplede linje for at illustrere, at der er et fald på omkring 20% i perioden fra marts 2015 til maj 2016.



Det er derfor DCE's opfattelse, at Photocats egne måledata viser, at NO_xOFF mister 10-20% aktivitet i løbet af en periode på omkring et år. Dette tab i aktivitet skal medindregnes i forbindelse med vurdering af helbredsgevinsterne af brugen af NO_xOFF over en længere årrække. Af side 55 fremgår, at Photocat forventer, at de behandlede arealer på 5.000 m² vil nedbryde mellem 41 kg NO_x (worst case) og 69 kg NO_x (best case) pr. år i minimum 15 år, hvilket vil give en samlet fjernelse af NO_x på mellem 615 og 1.035 kg NO_x, idet Photocat regner med, at den katalytiske evne ikke reduceres med tiden. Hvis man derimod regner med en reduktion i den fotokatalytiske aktivitet på 10% om året, vil man kun opnå en fjernelse af mellem 326 og 548 kg NO_x i løbet af 15 år. Altså kun lige lidt over halvdelen af den mængde, som Photocat beregner, at der fjernes i perioden på 15 år.

Photocat vurderer endvidere: "Rapporten har vist, at såfremt Roskilde kommune anvender 1-2% af de årlige øremærkede midler til udvikling af byens infrastruktur, vil der efter 30 år være fjernet omkring 1.500.000 kg NO_x fra luften i Roskilde kommune" (side 63). Da det er DCE's vurdering, at der sker en væsentlig reduktion af den katalytiske aktivitet, er der ikke belæg for denne konklusion. Der savnes endvidere mere detaljeret dokumentation for, hvordan de 1.500.000 kg NO_x er beregnet.

På basis af testmålinger af aktivitet i laboratoriet beregner Photocat den samlede fjernelse af NO_x i løbet af et år. Disse beregninger kan vi i princippet godt følge. DCE finder imidlertid, at der er nogle yderligere parametre som bør inddrages i betragtningerne. Dette drejer sig om følgende:

- Det beregnes, at katalysatoren fjerner 1,23 mg/m³ NO (afsnit 6.6.5). Imidlertid indeholder udendørs luft i Roskilde typisk omkring 20 µg NO_x/m³ i gennemsnit baseret på bybaggrundskoncentration målt i København, Odense, Aarhus og Aalborg (Ellermann et al., 2017). Det

er 50 gange mindre end den mængde NO, som katalysatoren er beregnet til at fjerne. Det betyder, at selve transporten med turbulensen af NO_x ned til overfladen kan være af betydning for hvor meget NO_x, der kan fjernes af katalysatoren. Dette bør undersøges nærmere.

- Der regnes med et samlet areal på de behandlede parkeringspladser på 5.000 m². Heri er medregnet selve parkeringsbåsene (figur 36 viser, hvordan selve parkeringsbåsene bliver sprøjtet med NO_xOFF). Af figur 21 og 23 fremgår, at en relativt stor del af parkeringspladsernes areal vil være optaget af biler, som sammen med omgivende huse og træer vil give skygge til de arealer, som er behandlet med katalysator. Skyggen fra biler, huse og træer vil reducere lysmængden tilført til de behandlede arealer, hvilket vil reducere katalysatoreffekten og dermed den samlede mængde NO_x, som kan fjernes. Dette bør der tages højde for i forbindelse med rentabilitetsberegningerne.
- Den hastighed, hvormed de katalyserede reaktioner foregår, er afhængig af temperaturen (s. 21). Beregningerne af hvor meget NO_x, der kan omdannes, inkluderer ikke effekten af temperaturen på reaktionshastigheden.
- Katalysatoreffekten kræver tilstedeværelse af vand på overfladen af titaniumdioxid (s. 20). Det nævnes, at vand kommer fra den naturligt forekommende vand i luften. Sort asfalt kan i sollys blive meget varm og dermed let blive knastørt. Er det undersøgt om mangel på vand kan begrænse effekten af katalysatoren?
- Photocat har beregnet massen af NO, der kan fjernes. Hvis også NO₂ fjernes, bør der tages hensyn til dette i forbindelse med beregning af den samlede masse af NO_x, som fjernes af katalysatoren.

4.4 Beregnet NO_x-emission

Demonstrationsforsøget

Photocat beregner, at den fotokatalytiske belægning på de 2 parkeringspladser i Roskilde på 5.000 m² kan fjerne 69 kg NO_x om året (Photocat, 2017, side 51). Som tidligere nævnt tager dette ikke hensyn til skyggeeffekten af holdende biler, som formodes at reducere potentialet. De 69 kg NO_x om året er det Photocat kalder "best case scenario".

I forbindelse med en tidligere rapport, som DCE har udført for Roskilde Kommune, blev den totale NO_x emission fra alle kilder i Roskilde Kommune i 2010 beregnet til 1.210 tons (1.210.000 kg) (Jensen et al., 2014). Emissionen må formodes at være faldet frem mod 2017, men trods et yderligere fald reducerer demonstrationsforsøget en forsvindende lille del af de samlede udledninger i kommunen.

Det beregnede potentiale på 69 kg NO_x om året kan også relateres til eksempelvis NO_x udledningen fra en bus. En gennemsnitlig dansk rutebus udleder omkring 5 g NO_x pr. kørt kilometer i bytrafik i 2015, og typisk kører en rutebus omkring 90.000 km årligt (Winther, 2017). Dette giver omkring 450 kg NO_x pr. år pr. bus. Den sparede NO_x for 5.000 m² appliceret fotokatalytisk overflade svarer derfor til omkring 15% af NO_x-udledningerne fra en enkelt bus pr. år.

Implementering i Roskilde Kommune

Photocat beskriver et scenarie, hvor Roskilde Kommune investerer 1-2% af de årlige øremærkede midler til udvikling af byens infrastruktur til fotokatalytiske belægninger. Det svarer til en årlig investering på hhv. 3,7 og 7,5 mio. kr. I dette scenarie antages det, at en sådan investering vil finde sted *hvert år* over en 15 årlig periode.

I scenarierne for de samfundsøkonomiske analyser (worst, base, best) anvender Photocat hhv. en pris på 11,3, 11,0 og 10,7 kr. pr. m² til overfladebehandlingen. Hvis prisen for basisscenariet på 11 kr. pr. m² anvendes svarer det til, at der årligt skulle behandles hhv. 336.364 m² (67 gange demonstrationsforsøgets arealet) og 681.818 m² (136 gange demonstrationsforsøgets arealet). Over de 15 år svarer det til hhv. 5.045.460 m² (1.009 gange demonstrationsforsøgets arealet) og 10.227.270 m² (2.045 gange demonstrationsforsøgets arealet)

Roskilde Kommune er 212 km². Hvis man skønsmæssigt antager, at 10% er Roskilde by svarer det til 21 km² eller 21.000.000 m².

Det svarer således til at omkring 1/4 til 1/2 af det samlede byareal (hvilket inkluderer ikke-befæstede arealer som græs mv.) i Roskilde skulle have fotokatalytisk behandling over den 15 årige periode eller der skulle inddrages meget store arealer af lodrette bygningsfacader.

4.5 Vurdering af målinger fra andre danske studier

Ud over det demonstrationsprojekt, som er gennemført i Roskilde, er der tre andre danske demonstrationsprojekter. Det drejer sig om et demonstrationsprojekt, som Photocat har udført i Københavns Lufthavn med NO_xOFF teknologi, et EU-projekt under ledelse af Teknologisk Institut af effekten af NO_x-reducerende overflader langs Fælledvej i København og Holbækmotorvejen nær Brøndby (Light2Cat), samt et demonstrationsforsøg på Gasværksvej i København med bl.a. deltagelse af Teknologisk Institut.

Demonstrationsprojekt i Københavns Lufthavn i 2013

Dette demonstrationsprojekt er udført af Photocat med delvis finansiering af Fornyelsesfonden.

Projektet er ikke afrapporteret i en rapport eller artikel, men alene tilgængelig i form af en PowerPoint præsentation fra en konference om 'Fotokatalytiske Materialer i Byrummet' arrangeret af Dansk Selskab for Materialeteknologi den 17. oktober 2013 (12 slides) (Photocat, 2013). Det er derfor vanskeligt til fulde at vurdere dette projekt, da metode og resultater ikke er detaljeret beskrevet i det tilgængelige materiale. Eksempelvis er der ikke værdier og enheder på figurer, som viser koncentrationer over tid.

Projektet er gennemført med belægningssten med Photocats NO_xOFF overflade på parkeringspladsen P8 i Københavns Lufthavn (forpladsen, Kastrup Tværvej D).

Målinger ved belægningsoverfladen er gennemført for NO, NO₂, NO_x (kun NO_x er afrapporteret) med NO_x-monitor med multiplexing hvert 30 sekunder mellem et areal med NO_xOFF og et tilstødende areal uden NO_xOFF. Målinger blev gennemført i 42 dage fra 11. maj til 4. juli 2013.

I Photocats rapport konkluderes følgende omkring dette projekt (side 5):

- Beviselig nedbrydelse af NO_x-forurening på parkeringsplads P8 i Københavns Lufthavn
- Fjernelse af op til 24 % af NO_x-forureningen i dagtimerne
- Gennemsnitlig nedbrydelse af NO_x-forurening på 13 % over en tidsperiode på 42 dage målt op i mod en tilsvarende reference måling
- Fjernelse af både peak værdier og nedbringelse af NO_x-forureningen på parkeringsplads P8 til under grænseværdierne

De tre første konklusioner er i overensstemmelse med konklusionerne i PowerPoint præsentationen.

Målingerne er gennemført i en meget lysintensiv periode fra maj til juli, og den opnåede gennemsnitlige NO_x reduktion på 13% må derfor anses for en høj gennemsnitlig værdi, som vil være væsentligt mindre, hvis et helt år var inddraget pga. den mørkere vinterperiode med lavere lysintensitet.

Gennem EU's luftkvalitetsdirektiv er der fastlagt en grænseværdi til beskyttelse af vegetation mod skadelige effekter relateret til NO_x. Grænseværdien gælder uden for bymæssige områder og er på 30 µg/m³ som årsmiddelværdi. Da der kun er målt i 42 dage, giver det ikke mening at sammenligne med et årgennemsnit, og sammenholde med en grænseværdi som tilmed er tiltænkt vegetation uden for bymæssige områder. DCE beregninger viser, at der ingen overskridelser var i Danmark i 2015 (Ellermann et al. 2016).

For NO₂ har EU en grænseværdi for beskyttelse af mennesker på 200 µg/m³, som kun må overskrides 18 gange pr. år som timeværdi. Der er næppe målt NO₂ værdier over 200 µg/m³, da disse ikke forekom i 2013 selv ikke på H.C. Andersens Boulevard, som er Danmarks mest befærdede bygade (Ellerman et al., 2015).

Demonstrationsprojekt på Fælledvej i København og langs Holbæk-motorvejen i 2013-2015

I et EU-projekt under Framework Program 7 (FP7) blev der gennemført to demonstrationsprojekter for test af TiO₂ teknologien i København dels ved Holbækmotorvejen nær Brøndby og på Fælledvej i København. Projektet hed Light2Cat med Teknologisk Institut som projektleder, og indeholdt også et demonstrationsforsøg i Valencia i Spanien. Projektet er afrapporteret i en projektrapport (Poulsen et al., 2016; hjemmeside se www.light2cat.eu). Der er ikke udarbejdet en international artikel på baggrund af projektet.

Holbækmotorvejen nær Brøndby

Der blev målt NO, NO₂ and NO_x med NO_x monitor langs Holbækmotorvejen. Til det eksperimentelle setup blev der anvendt et trafikværn i beton uden TiO₂ og et med TiO₂ (Light2CAT). Trafikværn i beton bruges til vejspærringer og midlertidig trafikomlægninger. Disse var placeret i nødsporet på langs og tæt på vognbanen på begge sider af en bro, som går over motorvejen. Der var 3 trafikværn på hver side, og på begge sider var der et trafikværn under en gennemsigtig Stevenson skærm. Formålet med skærmen er at reducere vindskabt turbulence langs trafikværnet, hvilket kunne gøre det vanskeligt at måle effekten på luftkvaliteten af den fotokatalytiske virkning. Luft pumpes fra skærm til NO_x monitor. Der blev målt simultant på referencestedet og TiO₂-stedet med samme NO_x-monitor (skiftevist hvert 5. minut). Grundet problemer med udstyret blev der kun målt fra marts 2015 til april 2015 (periode 1) og fra juli 2015 til august 2015 (periode 2).

Rapporten opgiver desværre ikke den gennemsnitlige reduktion af NO, NO₂, og NO_x over hele perioden men reduktioner af NO, NO₂ og NO_x i forskellige klasser af lysintensitet (10, 100, 200, 600 W/m²) for hhv. periode 1 og 2. Dette viser generelt stigende reduktion med stigende lysintensitet.

I periode 1 fra marts 2015 til april 2015 angives reduktioner for NO på 0,8% til 11%, for NO₂ på -0,9% til 8,6%, og for NO_x på 0,0% til 9,8%. I periode 2 fra juli 2015 til august 2015 angives reduktioner for NO på 6,8% til 10%, for NO₂ på 4,5% til 5,5%, og for NO_x på 5,6% til 7,9%. I modsætning til de andre studier, finder dette studie en reduktion af NO₂, som tilskrives særlige egenskaber ved Light2Cat fotokatalysatoren.

I Photocat rapporten sammenfattes konklusionen fra dette projekt på følgende måde (side 23): *"Endelig har EU for nylig udgivet en rapport på projektet Light2Cat med DTI som projektleder, hvor de også undersøgte den fotokatalytiske teknologi som en metode til at få bugt med luftforurening i København og Valencia. Konklusionen fra dette projekt var, at fotokatalyse direkte reducerer mængden af NO₂ i luften, og at den indirekte reducerer mængden af ozon. Desuden blev der blandt andet vist en nedbringelse af NO_x forureningen langs Holbækmotorvejen, nær Brøndby, på op til 10 % (Poulsen, Svec, & Folli, 2016)".*

Som beskrevet ovenfor er det ikke EU, som har udgivet en rapport, men en projektrapport, som er udgivet som en aflevering under et EU-projekt, som Teknologisk Institut har ledet.

I konklusionen angives, at NO_x reduceres med omkring 10%, men under favorable lysintensitetsforhold (>600 W/m²), dvs. i sommerhalvåret, og det vil være lavere, hvis det ses over hele året, da reduktionen generelt afhænger af lysintensiteten, som er lavere i vinterhalvåret.

Fælledvej i København

Der blev målt NO, NO₂ and NO_x med NO_x-monitor i 1,5 m højde i en referencerperiode fra oktober 2013 til juni 2014, som blev sammenlignet med perioden oktober 2014 til juni 2015, hvor TiO₂-teknologien (Light2Cat) blev anvendt som fortovsfliser fra Starka. Fliserne blev udskiftet på begge sider af Fælledvej (2 x 125 m). Der blev således målt i et år, hvor halvdelen af tiden var uden TiO₂-belægning og den anden halvdel med TiO₂-belægning. Global stråling blev også målt (w/m²).

Studiet konkluderer, at NO_x-koncentrationen i den katalytiske periode synes at være konstant lavere end i reference perioden for forskellige niveauer af lysintensitet. Desværre afrapporter rapporten ikke den gennemsnitlige reduktion for NO, NO₂ og NO_x over den målte periode.

Man kan ikke forvente at kunne isolere effekten af TiO₂-belægningen ud fra dette eksperimentelle setup, da der er forskelle i trafik, meteorologi og baggrundsforurening i disse to halvår. DCE vurderer derfor disse resultater som problematiske.

Photocats rapport omtaler ikke resultaterne fra Fælledvej i København.

Demonstrationsprojekt på Gasværksvej i København i 2012-2013

Dette projekt var et samarbejde mellem Teknologisk Institut, University of Aberdeen samt Starka Betongindustrier og Cementa AB. Projektet er delvist finansieret under den tidligere Videnkøpen-ordning for virksomheder under Uddannelses- og Forskningsministeriet, som administreres af Innovations-Fonden.

Dette studie er afrapporteret i videnskabelig artikel i anerkendt internationalt tidsskrift (Atmospheric Environment) (Folli et al., 2015). Det pågældende studie er ikke nævnt i Photocats rapport.

Forsøgsområdet var på Gasværksvej i København over en 200 m strækning, hvor den ene ende af de 100 m blev belagt med TiO₂-betonfliser på fortovet i begge sider leveret af Starka Betongindustrier, og den anden ende med almindelige betonfliser. Fliserne blev lagt i juni 2012, mens målinger blev gennemført i mere end et år fra april 2012 til august 2013. NO, NO₂ og NO_x blev målt hvert minut med NO_x-monitor placeret på hver af de 100 m strækninger. Målinger blev udført i 2 meters højde ved husfacaden.

Endvidere blev der udført laboratoriemålinger af effekten af TiO₂ fliserne, som viste op til 78% omdannelse af NO til nitrat med lav dannelse af NO₂.

Dette studie fandt ikke en signifikant forskel på NO₂-koncentrationer i gaderummet, når man sammenlignede målinger fra arealerne med og uden TiO₂.

Studiet viste som forventet en sæsonvariation i reduktion af NO med mindst i vinterhalvåret og størst om sommeren, som afspejler sæsonvariationen i lysintensiteten. Den maksimale månedlige reduktion af NO var 22% ved sommersolhverv. Desværre oplyser artiklen ikke den gennemsnitlige NO-reduktion over et helt år selvom det er målt. Den vil være væsentlig mindre end 22%.

Observerede reduktioner af NO_x (NO og NO₂) var derfor drevet af reduktion af NO, da NO₂ ikke ændrede sig signifikant.

4.6 Vurdering ud fra et internationalt review studie

Vi har endvidere inddraget konklusionerne fra et internationalt review fra 2016 af NO_x reducerende belægninger generelt udført af en luftkvalitets ekspertgruppe for Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra) i Storbritanien (miljøministeriet), som rådgiver Defra's videnskabelige hovedrådgiver, Defra ministre, skotske ministre, den walisiske regering og miljøministeriet i Nordirland (Monks et al., 2016).

Rapporten konkluderer bl.a. følgende i sammenfatningen:

- Under laboratorieforhold har fotokatalytiske overflader (TiO₂) vist sig effektive til at reducere koncentrationen af NO_x.
- Der har været to store EU-finansierede projekter, som har undersøgt disse materialer i feltstudier: PICADA og Photopaq. PICADA har rapporteret betydelige reduktioner i NO_x-koncentrationen, men var imidlertid urealistisk i den forstand, at testen havde et meget høj forhold mellem overflade og volumen. (Dvs. stor behandlet overfladeareal i forhold til et relativt lille volumen af luft vil føre til stor NO_x reduktion).
- De mere omfattende og omhyggeligt designede feltforsøg, som blev udført som del af Photopaq (gaderum + belyst tunnel) rapporterede ingen overbevisende resultater i forhold til om disse materialer resulterer i en reduktion i NO eller NO₂-koncentrationer.

- En feltundersøgelse i London viser ikke stærke beviser for reduceret NO_x-koncentrationer på grund af fotokatalytiske overflade, og det var svært at få øje på nogen klar effekt, der kunne henføres til indflydelsen af malingen.
- Modelsimuleringer ved hjælp af ADMS-Urban modellen for et scenarie med fotokatalytisk maling dækkende London og i et lukket gaderum antyder meget små reduktioner i NO_x-koncentrationen på op til ca. 0,7%. Disse resultater er usikre i betragtning af kompleksiteten af depositionsprocesser i byområder. Faktiske virkninger forventes at blive mindre, fordi det er usandsynligt, at sådanne store områder kan dækkes med fotokatalytisk maling.
- En 0,7% reduktion af NO_x-koncentrationen kunne også opnås ved en 1,1% reduktion i NO_x-emissioner fra trafikken i en gade baseret på gennemsnitlig køretøjsfordeling i det centrale London.
- Sammenlignet med emissionsregulering, er det udfordrende at reducere emissioner, som er blevet fortyndet i atmosfæren. Det er meget sværere at fjerne forurenende stoffer fra atmosfæren på grund af den store mængde af luft i forhold til overfladearealet af en eventuelle potentiel renseteknologi.
- Ud fra en helhedsbetragtning er der lille nuværende evidens for, at udbredt brug af fotokatalytiske overflader vil reducere luftens koncentrationer af NO₂. Desuden er der en risiko for, at disse materialer vil resultere i produktionen af andre uønskede stoffer såsom salpetersyring (HONO) og formaldehyd (HCHO), som kan have større indvirkning på atmosfærens kemi samt have helbredsskadelige virkninger.
- Fotokatalytiske overflader kan reducere koncentrationer tæt på den behandlede overflade, men dette vil ikke resultere i betydelige reduktioner i NO₂-koncentrationer i den omgivende luft. Det er ikke fysisk muligt for tilstrækkeligt store mængder af luft at interagere med overfladen under normale vejrforhold, og derfor vil denne metode ikke fjerne tilstrækkeligt med molekyler af NO₂ til at have en betydelig indvirkning på luftens koncentrationer.

Dette review studie er således meget kritisk overfor fotokatalytiske overflader, som et virkemiddel til at forbedre luftkvaliteten. Studiet anderkender en effekt under laboratorieforhold, men vurderer at under feltforhold er effekten for NO_x og NO₂ meget begrænset.

5 Vurdering af eksterne omkostninger og samfundsøkonomisk analyse

I Photocats rapport foretages en samfundsøkonomisk vurdering af effekterne af overfladebehandlingen. Beregningerne foretages ved at bestemme reduceret NO_x og de tilhørende samfundsøkonomiske gevinster ved reducerede helbredseffekter. Den økonomiske gevinst ved de sparede helbredseffekter blev sammenholdt med omkostningerne ved overfladebehandlingen. I beregninger blev der antaget 15 års levetid for overfladebehandlingsens NO_x reducerende virkning.

I forhold til den samfundsøkonomiske analyse foretager DCE ikke en vurdering af alle forudsætninger omkring den samfundsøkonomiske analyse. DCE har fokus på at vurdere de forudsætninger, som vedrører de eksterne omkostninger for NO_x relateret til helbredsomkostninger, hvor der henvises til data, som stammer fra DCE, samt de spørgsmål som gennemgangen af demonstrationsforsøget i Roskilde giver anledning til, og som har betydning for den samfundsøkonomiske analyse.

5.1 Externe enhedskostninger for et kg udledt NO_x

I den samfundsøkonomiske analyse benytter Photocat en enhedsomkostning på 184 kr. pr. kg NO_x , som stammer fra DCE (Brandt et al. 2016, side 32). Denne omkostning gælder i gennemsnit for alle emissionskilder under et i 2013 i Danmark. Photocat argumenter for et byfokus i rapporten og kunne derfor også have valgt enhedsomkostninger fra vejtransportsektoren, som værende repræsentativ, hvilket ville have resulteret i en omkring 35% lavere enhedsomkostninger (Brandt et al. 2016, side 32 beregnet for 2008). Dette ville have givet en enhedsomkostning på omkring 119 kr. pr. kg NO_x .

I Brandt et al. (2016) blev det beregnet, hvor stor en del af omkostningerne for NO_x , som falder i Danmark og uden for Danmark. Disse DCE beregninger viser, at for danske NO_x -udledninger forekommer omkring 12% af helbredsomkostningerne i Danmark og 88% i udlandet.

Rapporten nævner, at lande som fx Norge og Storbritannien har enhedsomkostninger for NO_x som afhænger af befolkningstætheden med højere enhedsomkostninger jo højere befolkningstæthed.

Som det er beskrevet tidligere, skal NO_x først omdannes til nitratholdige partikler for at hovedparten af den helbredsskadelige effekt finder sted. Dette tager tid og sker derfor ikke inden for byområdet. Hvis man har højere NO_x -enhedsomkostninger i byer, må man derfor tilskrive NO_2 en selvstændig helbredseffekt lokalt. Der er fortsatte diskussioner af hvilke dosis-respons, man skal bruge, og i hvilken grad der er tale om en selvstændig effekt af NO_2 i forhold til for tidlig død, dobbelttælling i forhold til $\text{PM}_{2.5}$ mv.

I DCE's beregninger er der indtil videre forudsat, at der ikke er lokale helbredseffekter af NO_2 , men videngrundlaget peger i stigende grad på, at der kan være selvstændige lokale helbredseffekter af NO_2 . DCE arbejder på at indarbejde eksponerings-respons for NO_2 i EVA-systemet, men det er endnu ikke færdigt.

Det Europæiske Miljøagentur har i deres rapport for luftkvalitet i Europa i 2015 for første gang inkluderet NO₂ i beregninger af for tidlige dødsfald (European Environmental Agency, 2016). Her udgør for tidlig død pga. NO₂ 2% af det beregnede antal for tidlige dødsfald for Danmark. I rapporten for 2016 er det omkring 4% eller 18% afhængig af hvilke forudsætninger, der anvendes for, hvornår for tidlig død optræder (ved hhv. 20 eller 10 µg/m³) (European Environmental Agency, 2017). Hvis man anvender 20 µg/m³ som tærskel i bybaggrundsluften, vil der ikke være for tidlige dødsfald pga. NO₂ i Danmark, da vi måler under denne tærskel i det nationale overvågning af luftkvaliteten i Danmark (Ellermann et al., 2017). I København ligger NO₂-årsmiddelværdien på omkring 16 µg/m³. Hvis tærsklen er 10 µg/m³, vil der således være for tidlige dødsfald pga. NO₂.

I hidtidige beregninger afhænger DCE's enhedsomkostning for NO_x ikke af bystørrelse, hvilket den fx gør for primære emissioner af partikler. Faktisk falder de lidt med stigende bystørrelse for NO_x. Det skyldes, at ozonniveauerne stiger, hvis NO_x (NO+NO₂) emissioner reduceres, da NO reagerer med ozon under dannelse af NO₂, og mindre NO vil derfor give højere ozonkoncentrationer under danske forhold, og ozon er helbredsskadeligt lokalt (Brandt et al. 2016).

5.2 Samfundsøkonomisk analyse

En væsentlig anke mod de fremlagte samfundsøkonomiske analyser er, at Photocat har antaget en kontant holdbarhed af den fotokatalytiske effekt på 15 år, hvilket ikke er begrundet i rapporten. Dette er i modstrid med resultater præsenteret i rapporten, som snarere viser, at effekten af NO_xOFF reduceres 10-20% efter et år.

Hvis man eksempelvis regner med en reduktion i den fotokatalytiske aktivitet på 10% om året, vil man kun opnå lidt over halvdelen af den mængde, som Photocat beregner, som fjernes i perioden på 15 år. Dette har væsentlig indvirkning på, om tiltaget er samfundsøkonomisk rentabelt eller ej.

I scenarierne (worst, base, best) angiver Photocat tilbagebetalingstider *uden* tilbagediskontering, men dette er ikke normal praksis i samfundsmæssige analyser, hvor tilbagediskontering inkluderes. I worst case scenariet angiver Photocat eksempelvis selv et samfundsøkonomisk tab på 0,5 kr./m², dvs. investeringen er ikke tilbagebetalt over 15 år, men skriver så, at hvis man ser bort fra tilbagediskontering, er tilbagebetalingstiden 10 år.

I august 2017 offentliggjorde Finansministeriet en revideret og opdateret udgave af Vejledning i Samfundsøkonomiske Konsekvensvurderinger (Finansministeriet, 2017). Heri anbefales fx en diskonteringsrate på 4 %, men trinvist faldende, og skatteforvridningsfaktoren på 10%, mens nettoafgiftsfaktoren er 1,325 (Andersen, 2017).

Den samfundsøkonomiske analyse i Photocats rapport benytter tidligere vejledninger. Det kræver nye beregninger for at belyse, hvordan disse nye forudsætninger påvirker de samfundsøkonomiske analyser, som er opstillet i Photocats rapport.

I forbindelse med den reviderede vejledning har Finansministeriet også opskrevet værdien af statistisk liv, således at denne værdi nu er 32 mio. kr. (2017-priser). Dette har også betydning for enhedsprisen for NO_x. DCE er ved at implementere disse nye forudsætninger i EVA-systemet, som ligger til grund

for beregning af enhedspriser. Dette forventes at gøre enhedsprisen for NO_x omkring en halv gang større. Denne ændrede enhedspris vil alt andet lige forbedre rentabiliteten i de samfundsøkonomiske analyser.

6 Referencer

Andersen, 2017. Personlig kommunikation med Mikael Skou Andersen, DCE, den 13. november 2017.

Brandt, J., Jensen, S.S., Andersen, M.S., Plejdrup, M.S., Nielsen, O.K. 2016. Helbredseffekter og helbredsomkostninger fra emissionssektorer i Danmark. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 47 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 182 <http://dce2.au.dk/pub/SR182.pdf>

Ellermann, T., Nøjgaard, J.K., Nordstrøm, C., Brandt, J., Christensen, J., Ketzel, M. Jansen, S., Massling, A. & Jensen, S.S. 2015. The Danish Air Quality Monitoring Programme. Annual Summary for 2013. Aarhus University, DCE - Danish Centre for Environment and Energy, 72 pp. Scientific Report from DCE - Danish Centre for Environment and Energy No. 134. <http://dce2.au.dk/pub/SR134.pdf>

Ellermann, T., Bossi, R., Nygaard, J., Christensen, J., Løfstrøm, P., Monies, C., Grundahl, L. & Geels, C. 2016: Atmosfærisk deposition 2015. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. 70 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 204. <http://dce2.au.dk/pub/SR204.pdf>

Ellermann, T., Nygaard, J., Nøjgaard, J.K., Nordstrøm, C., Brandt, J., Christensen, J., Ketzel, M., Massling, A., Bossi, R. & Jensen, S.S. 2017. The Danish Air Quality Monitoring Programme. Annual Summary for 2016. Aarhus University, DCE - Danish Centre for Environment and Energy, 78 pp. Scientific Report from DCE - Danish Centre for Environment and Energy No. 234. <http://dce2.au.dk/pub/SR234.pdf>

European Environmental Agency (2016): Air quality in Europe – 2016 report. EEA Report No 28/2016. ISSN 1977-8449.

European Environmental Agency (2017): Air quality in Europe – 2017 report. EEA Report No 13/2017. ISSN 1977-8449.

Finansministeriet (2017). Vejledning i samfundsøkonomiske Konsekvensvurderinger. August 2017.

Folli, A., Strøm, M., Madsen, T.P., Henriksen, T., Lang, J., Emenius, J., Klevebrant, T., Nilsson, Å (2015): Field study of air purifying paving elements containing TiO₂. Atmospheric Environment 107 (2015) 44-51.

Hertel, O., 2017: Personlig kommunikation med Professor Ole Hertel, DCE, den 7. november 2017.

Jensen, S.S., Ketzel, M. & Brandt, J. 2014. Partikelforurening og helbredseffekter i Roskilde Kommune. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 60 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 107 <http://dce2.au.dk/pub/SR107.pdf>

Monks et al. 2016: Paints and Surfaces for the Removal of Nitrogen Oxides. By Air Quality Expert Group prepared for Department for Environment,

Food and Rural Affairs (Defra), UK; Scottish Government; Welsh Government; and Department of the Environment in Northern Ireland. 19 p.

Nielsen et al. (2017). Annual Danish Informative Inventory Report to UNECE. Aarhus University, Danish Centre for Environment and Energy (DCE).

Photocat (2013): PowerPoint præsentation fra en konference om 'Fotokatalytiske Materialer i Byrummet' arrangeret af Dansk Selskab for Materialeteknologi den 17. oktober 2013 (12 slides).

Photocat (2017): Miljøprojekt med fokus på NO_x forurening på Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde Parkeringsplads og Bønnelyckes Parkeringsplads. Afslutningsrapport (31/08/2017). 68 s.

Poulsen, S. L., Svec, O. M., & Folli, A. (2016). Assessment of the air quality after the execution of the photocatalytic structures. FP7-ENV-2011-ECO-INNO-TwoStage-283062-Light2CAT-DL-DTI-D5.3. 10.03.2016.

Winter, M., 2017: Personlig kommunikation med Morten Winther, DCE, den 27. oktober 2017.