



**Miljøprojekt med fokus på NO_x forurening på Skt.
Peder-/Skt. Ols Stræde Parkeringsplads og Bønnelyckes
Parkeringsplads**

**Afslutningsrapport
(15/02/2018)**

Titel Miljøprojekt med fokus på NO_x forurening på Skt.Peder-/Skt.Ols
Stræde Parkeringsplads og Bønnelyckes Parkeringsplads.

Klient Roskilde Kommune
Køgevej 80
DK-4000 Roskilde

Att: Bjørn Viinblad Mikkelsen
Projektleder, Veje og Grønne Områder

Udarbejdet af Photocat A/S
Langebjerg 4
DK-4000 Roskilde

Att: **Henrik Jensen**
Chief Technical Officer

Reference nr.

Projektperiode 06/2014 til 08/2017

Dato Publiceret den 15/02/2018

Version 2017-02 (tilrettet efter dialog med Nationalt Center for Miljø og Energi)

Sideantal 76

Resume

I denne rapport er der beskrevet og dokumenteret en ny løsning til at afhjælpe med luftforurening i byrummet. Photocat og Roskilde Kommune har gennem et 3-årigt projekt med levetidsforlængende NO_xOFF behandling af 5.000 m² parkeringsareal på henholdsvis Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde og Bønnelyckes Plads vist, at den fotokatalytiske teknologi er et konkret og økonomisk rentabelt instrument til at rense luften i byrummet. I projektet blev der udviklet en optimeret fotokatalytiskbehandling til asfaltbelægningen i Roskilde Kommune. Samtidig blev der udviklet et in-situ set-up til at teste aktiviteten af den udviklede løsning over projektets varighed på tre år. Baseret på testresultaterne fra projektet blev det konkluderet, at den fotokatalytiske NO_xOFF behandlingen er meget stabil over tid, hvorved det kan konkluderes at såfremt der anvendes en solindstråling på 563 kWh/m² per år indeholdende 5 % UV lys, renser de to parkeringspladser luften for op til 13,8 g NO_x/m² om året, hvilket omregnet udgør 69 kg for de behandlede parkeringsarealer om året. Endeligt blev det i projektet konkluderet, at den samfundsmæssige gevinst over 15 år for de to parkeringspladser udgør 51 kr. per m². Ud fra arbejdet og analysen i rapporten anbefales det at indtænke aktive overflader i renovering og nybyggeri i Roskilde kommune.

Abstract

In this report, a new solution to mitigate air pollution in cities has been analysed and documented. Photocat & Roskilde Municipality have in a 3-year real-life test proven that the photocatalytic technology is both a tangible and economic cost-effective instrument to clean the air in cities with a life-sustaining NO_xOFF treatment of 5,000 m² in the parking lots of Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde and Bønnelyckes Plads. An optimised photocatalytic treatment to the asphalt surface in Roskilde Municipality was developed for the project. At the same time an in-situ set-up was developed enabling to test the activity of the photocatalytic treatment in the test period of three years. Based on the test result it was concluded that the photocatalytic NO_xOFF treatment is stable over time by which it can be concluded that if an incoming solar radiation of 563 kWh/m² per year containing 5 % of UV light is used the two parking lots clean the air for up to 13.8 g NO_x/m² yearly, which in total amount to 69 kg per year for the parking lots. Finally, it was concluded that the two parking lots amount to a socioeconomic profit of DKK 51 per m² in a period of 15 years. Based on the report's results it is highly recommended to incorporate active surfaces in restoration and new construction in Roskilde Municipality.

Indholdsfortegnelse

1.	Introduktion	4
1.1.	Projektdefinition.....	6
1.2.	Projektplan	7
2.	Luftforurening	9
2.1.	Luftforurenings effekt på sundhed	11
2.2.	Regulering og lovgivning	12
3.	Samfundsmæssige omkostninger relateret til luftforurening.....	14
3.1.	Luftforurening i Danmark	16
3.2.	Luftforurening i Roskilde kommune	18
4.	Den Fotokatalytiske Teknologi.....	19
4.1.	Fotokatalyse i det nære byrum	25
5.	Mobilitet og NO _x forurening i byrummet.....	28
5.1.	Mobilitet i storbyer	28
5.2.	NO _x forurening i Stockholm.....	30
5.3.	Fotokatalyse som et instrument i det nære byrum.....	34
6.	Resultater	35
6.1.	Lokationer	35
6.2.	For-projekt undersøgelse	37
6.3.	In-situ målings set-up	43
6.4.	Behandling af Parkeringspladserne	48
6.5.	Målinger.....	49
6.6.	Databehandling	51

6.7.	Delkonklusion	56
7.	Samfundsøkonomisk analyse af NO _x reduktion ved brug af NO _x OFF teknologien.....	57
7.1.	Metode.....	57
7.2.	Samfundsøkonomisk projekt evaluering.....	62
8.	Konklusion.....	71
9.	Referencer.....	73

1. Introduktion

Photocat A/S blev grundlagt i 2009 med en klar mission om at rense den luft, som vi indånder. Photocat har sidenhen arbejdet på at skabe og udvikle en teknologisk platform, som kan implementeres på flere byggematerialer, på overflader i bebyggede områder og som udnytter energi fra dagslys til at omdanne giftige kvælstofilter. Siden grundlæggelsen har Photocat udviklet, patenteret og kommercialiseret den teknologiske platform til anvendelse på gulve, beton og tagpap. Platformen bygger på den fotokatalytiske teknologi (se kapitel 0), som blev opdaget tilbage i 1972 (Fujishima & Honda, 1972) og som efter teknologiens opdagelse blev nomineret til Nobelprisen i kemi (Pendlebury, 2012).

På trods af den tidlige opdagelse af den fotokatalytiske teknologi, har den først vundet sit kommercielle frempas i de seneste årtier. Overordnet har der været tre problemer, som har forårsaget en lang overførelse af teknologien fra det akademiske miljø til de relevante industrier:

- 1. Høj produktionspris per m²:** I de første versioner af teknologien blev TiO₂ (titaniumdioxid) anvendt i pulverform, hvilket medførte spild i produktionsprocessen og dermed en underudnyttelse af den indkøbte råvare. Som eksempel vil man i betonindustrien blande TiO₂ i hele matrixen, hvormed kun en lille andel af den fotokatalytiske råvare (TiO₂) eksponeres mod lys i den virkelige verden. Denne omkostning har man prøvet at viderebringe til slutbrugeren uden held, da effekten man har kunnet fremvise, i forhold til omdannelsen af giftige kvælstoffer, har været minimal. Dette er en af årsagerne til, at teknologien har været længe om at kommercialisere, da ingen har skudt forbruget i gang og som videre hen skabt en skalering af teknologien, som gør den omkostningseffektiv og værd at investere i for producenter af byggematerialer.
- 2. Lav effektivitet:** På kommercielt niveau har man i flere år markedsført produkter, der har en særdeles lav effekt. Dette skyldes, at der fra virksomhederne har været et ønske om at levere produkter med den fotokatalytiske teknologi. Implementeringen i produktion har været dyr og de valgte metoder, som nævnt overfor, har ikke været effektiviseret efter princippet om at kunne maksimere den fotokatalytiske effekt.
- 3. Hvide overflader:** Den fotokatalytiske teknologi er baseret på stoffet TiO₂, som er hvidt. Dette har forårsaget at en kommercialisering af teknologien har været begrænset til materialer og produkter med hvide overflader.

Photocat har målrettet arbejdet mod løsninger til hver af de ovenfor førte problemstillinger, som i høj grad også interagerer med hinanden. Fra Photocats begyndelse som en afdeling i SCF Technologies A/S og til i dag er der investeret i at løse ovenstående problemer og udvikle en teknologi, der på kommerciel basis kan opnå en skalering, som vil føre til en lavere koncentration af luftforurening i byer over hele verden, skabe jobs i Danmark og videre stadfæste Danmarks engagement på bæredygtighed, miljø og klima.

Resultatet af flere års forskning i samarbejde med universiteter, det akademiske miljø for fotokatalyse og nogen af verdens største producenter af byggematerialer har ført til, at man i dag i Photocat har udviklet produkter, som medfører en minimal forøgelse af produktionsprisen per m² og som ikke er begrænset af kun at være anvendelig på hvide produkter og overflader, men kan anvendes på alle farver. Yderligere som et led i denne udvikling har Photocat også formået at opnå en højere fotokatalytisk effektivitet.

Photocat's teknologiske platform er opdelt i 13 patentfamilier som er beskyttet af 92 patenter og patentansøgninger over hele verden. Patenterne og den viden man har oparbejdet gælder både formulering af fotokatalytiske produkter, appliceringsmetoder der giver en høj effektivitet og implementering af disse i produktionen, hvilke medfører en lavere omkostning per m² end det tidligere har været tilfældet.

Visionen for Photocat er at udnytte sin teknologi til at skabe en vedvarende positiv ændring af den luft vi mennesker og naturen bliver eksponeret mod. Med fotokatalyse angribes luftforurening fundamentalt anderledes, da den ikke er kildespecifik men i stedet renser luftforurening, hvor mennesker færdes. Baggrund

Baggrunden for projektet omhandlende at gøre Roskilde til en *aktiv* by, hvormed det bebyggede areal i kommunen bidrager aktivt til at holde luften ren til gavn for både indbyggere i Roskilde kommune samt plante- og dyreliv, var, at Photocats NO_xOFF teknologi var dokumenteret i et toårigt demonstrationsforsøg i Københavns Lufthavn med overbevisende resultater. Demonstrationsforsøget var delvist finansieret af Fornyelsesfonden og blev afrapporteret 17. oktober 2013 ved konferencen 'Fotokatalytiske Materialer i Byrummet'. Konferencen var arrangeret af Dansk Selskab for Materialeteknologi (DSM) og afholdt i Ingeniør huset, hvor hovedkonklusionerne var følgende:

- 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

Roskilde Kommune er en foregangskommune og en aktiv kommune inden for klima og miljøforbedrende løsninger og er opsat på at promovere og teste nye og bedre løsninger. Roskilde er desuden en af de ældste byer i Danmark med knap 49.000 indbyggere (2014) og ca. 84.000 indbyggere i hele Roskilde Kommune (2014) samt et areal på i alt 212 km², hvilket gør Roskilde til den 10. største by i Danmark.

Roskilde Kommune har grundet sit engagement i klima og miljø nyligt bestilt og offentliggjort en rapport (Partikelforurening og helbredseffekter i Roskilde Kommune, Nr. 107, 2014) udarbejdet af DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, ved Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab. Rapporten viser, at selvom Roskilde Kommune har et luftforurenings niveau, befindende under grænseværdierne, forefindes der stadig 64 præmature dødsfald årligt pga. luftforurening og blandt andet som følge heraf en estimeret ekstra udgift til Roskilde Kommune på hele 500 mio. DKK per år, som udelukkende relaterer sig til luftforurening.

I juni 2014 blev der indgået en aftale mellem Roskilde Kommune, Veje og Grønne Områder, og Photocat A/S om at gennemføre et demonstrationsforsøg på to parkeringspladser i Roskilde by. Forsøget har til formål at afprøve NO_xOFF teknologien, som et konkret instrument til at løse de stadig stigende problemer med luftforurening - indlands såvel som udenlands. Dette selvom at Roskilde Kommune ikke har en opfattelse af at have konkrete problemer med NO_x forurening i henhold til gældende EU-regler (se afsnit 2.2). Roskilde Kommune ønsker dog

at være på forkant og er derfor af den overbevisning, at det er bedre at sikre borgerne ved rettidig forståelse af teknologiens muligheder og på denne baggrund skabe bedre planlægningsgrundlag. Det overordnede mål for projektet er, at Roskilde Kommune og Photocat ønsker at skabe et projekt, der giver synlighed for borgerne omkring vigtigheden af en god luftkvalitet og samtidig sikrer forståelse for Kommunes miljøpolitik og ansvarlighed.

1.1. Projektdefinition

Roskilde Kommune ønsker gennem sin aktive miljøpolitik at anvende nye innovative tiltag inden for luftrensning. Photocat har udviklet og kommercialiseret en teknologi, der vha. fotokatalytiske materialer kan anvendes til forbedring af luftkvaliteten ved at nedbryde skadelige stoffer som for eksempel NO_x. Denne teknologi bygger på et princip om at gøre passive overflader i byrummet aktive og dermed aktivt inddrage byrummet i løsningen af tidens udfordringer mht. vores måde at leve på.

Roskilde kommune og Photocat indgik 12. juni 2014 en aftale om at anvende parkeringspladserne beliggende på henholdsvis Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde og Bønnelyckes Plads som demonstrationsområde og samtidigt understøtte kommunens aktive miljøpolitik.

Målet er, at Roskilde kommune og Photocat skaber et projekt, der giver synlighed for borgerne i kommunen omkring vigtigheden af god luftkvalitet og samtidigt sikrer forståelse for kommunens miljøpolitik og ansvarlighed.

Dette udmøntes som nedenstående:

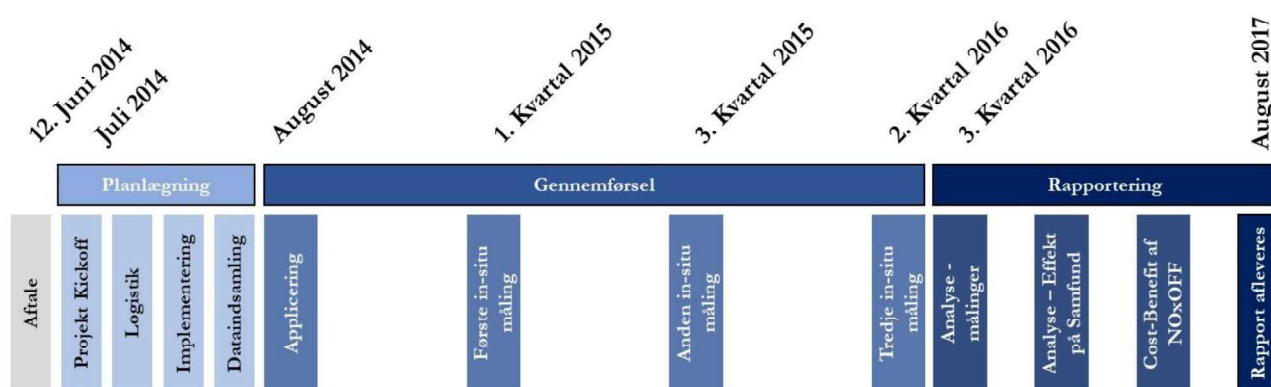
- 1) At øge borgernes fokus på luftkvalitet i byen og synliggøre at kommunen faktisk gør noget ved udfordringen.
- 2) Reduktion af NO_x belastningen på parkeringspladserne.
- 3) Forberede kommunens anbefaling af, at alle anlægsarbejderne i byen, i det omfang det er økonomisk forsvarligt, skal anvende fotokatalytiske teknologier, der øger luftkvaliteten i Roskilde.
- 4) Gennemførelse af en aktiv luftrensningsteknologi, som sikrer en langvarig positiv effekt på luften ved inddragelse af egnede byggemateriale og dermed lave den økonomisk mest rentable politik for luftkvalitetsforbedring.
- 5) Validere og dokumentere NO_x reduktion på parkeringspladserne.

Projektet var planlagt over en 3-årig projektperiode med projektstart af gennemførselsfasen 1. august 2014 og med afslutningsrapport afleveret i august 2017.

1.2. Projektplan

I projektet 'Aktive Overflader' er der fokus på resultaterne og formidling af fordelene ved Photocat's NO_xOFF teknologi. Projektet er opdelt i følgende 3 faser: 1) Planlægning, 2) Gennemførelse og 3) Rapportering.

Figur 1: Projektplan for NO_xOFF implementering I Roskilde Kommune



I Planlægningsfasen vil projektet blive gennemarbejdet mht. logistik, implementering, dataindsamling og dataanalyse. Herunder koordinering med Roskilde Kommune Park og Vej mht. den praktiske udførelse af projektet til mindst gene for brugerne af de to udvalgte parkeringspladser. I Planlægningsfasen vil den bedst egnede NO_xOFF teknologi blive udvalgt til appliceringen på parkeringspladserne. Det indebærer, et laboratoriestudie omkring optimering af NO_xOFF væsken, hvormed den ønskede effekt opnås på parkeringspladserne. I denne fase vil ISO standarden for NO_x fjernelse vha. af fotokatalysatorer blive anvendt, også kendt som ISO 22197-1, og der vil blive udarbejdet en definition af den metode, der anvendes til den løbende in-situ måling af de aktive parkeringspladser.

I Gennemførelsesfasen vil de to parkeringspladser blive behandlet med NO_xOFF teknologien. Det indebærer bl.a. rengøring, applicering samt tørretid inden parkeringspladserne kan tages i brug. Derudover vil der i Gennemførelsesfasen blive testet og valideret den in-situ metode, som skal anvendes løbende i projektet for at teste og måle på gevinsten ved NO_xOFF parkeringspladserne.

I Rapporteringsfasen vil de indsamlede data blive behandlet og den afsluttende rapport færdiggjort. Denne fase indebærer også et studie i business casen for Roskilde Kommune ved at anvende fotokatalytisk teknologi som et aktivt redskab til nedbringelse af luftforurening.

I den følgende tabel er de 3 projektfaser skitseret, ligesom de individuelle mål og resultater er beskrevet.

Tabel 1: Beskrivelse af projektforsløb

Projekt Trin	Indhold/Mål	Vigtigste Fordele
1. Planlægning	▪ Forstå, hvordan den NO_x reducerende teknologi virker ▪ Optisk test, hvordan ser det ud ▪ Forklaring af testudstyr ▪ Definition af projektets omfang, områder, plan & målsætning ▪ Definition af projektets ansvars- & kontakt- personer	▪ Lokal projektgruppe etableret ▪ Fælles forståelse af projektets omfang & indhold ▪ Nogleinteressenter opmærksomme & inddraget ▪ Erfaringer & målsætninger, fordeling af arbejdsbyrde & konkretisering af tidslinje
2. Applikation, dataindsamling & analyse	▪ Rengøring af overfladerne ▪ Applikation af NO_xOFF ▪ Validering af resultaterne	▪ Alle relevante data kombineres & inkluderes ▪ Reelle demonstrationer ▪ Transparente & håndgribelige resultater
3. Rapportering	▪ Præsentere, fortolke og diskutere resultater & arbejde ▪ Del erfaringer & læring	▪ Resultater af test & observationer

Den skitserede arbejdsplan er baseret på levetidsforlængelse af de eksisterende overflader på Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde og Bønnelyckes Plads og derved en efterbehandling af den eksisterende belægning med NO_xOFF teknologien.

For at forstå effekten af projektet i Roskilde Kommune, vil der i de følgende afsnit fremgå en definition af luftforurening som begreb, hvilken påvirkning luftforurening har på vores sundhed samt hvordan luftforurening reguleres.

2. Luftforurening

Luftforurening er den største globale miljømæssige trussel mod vores sundhed, både på kort- og langsiget. Alene i Europa medfører luftforurening 400.000 præmature dødsfald årligt. Vind og vejr spreder luftforurening, hvilket bevirker, at den lokalt producerede luftforurening eksporteres til nabokommuner, -regioner og -lande. Det er derfor en udfordring at regulere luftforurening (The United Nations, 2016). I Danmark stammer omkring halvdelen af luftforureningen, som danskerne eksponeres mod, fra udlandet. Ligeledes eksporteres omkring halvdelen af de danske emissioner til udlandet. Den samlede danske luftforurening består hermed af både lokale og internationale kilder, som udgør et sammenligneligt niveau med den totale danskproducerede forurening (Danish Center for Environment and Energy, 2016).

“Because transboundary sources often are major contributors to urban pollution, many European cities will be unable to meet WHO guideline levels for air pollutants through local action alone. Even national and Europe-wide action may not be enough in some cases”
(The United Nations, 2016)

Luftforurening består i sin samlede betegnelse af fire emissionsstoffer: **NO_x** (Nitrogen Oxides), **NMVOCs** (Non-methane volatile organic compounds), **SO₂** (Sulphur Oxides) og **NH₃** (Ammonia) (European Environment Agency, 2016). Fælles for dem alle er, at de medfører store sundhedsmæssige konsekvenser og samtidig også bidrager til forurening af landbrug, vand, dyre- og planteliv. De mange negative følger, som luftforurening er en direkte kilde til, har fået EU's medlemslande til at forpligte sig til at nedbringe emissioner af ovennævnte stoffer, hvormed de alle har fastlagt nationale reduktionsmål for de enkelte luftforurenende stoffer (Den Europæiske Unions Tidende, 2016).

Baggrunden for de reviderede reduktionsmål skyldes blandt andet, at flere EU-lande i perioden 2010-2014 kontinuerligt overskred deres emissionslofter for særligt NO_x, NMVOCs og NH₃. Danmark var ikke en undtagelse, men har dog formået at sænke niveauet for NO_x sidenhen, hvilket bevirker, at Danmark i dag befinder sig under den fastsatte grænseværdi på årsgennemsnit. Luftforurening i Danmark er dog fortsat en stor bidragsyder til præmature dødsfald og en direkte kilde til adskillige sygdomme, som medfører store samfundsøkonomiske udgifter (Danish Center for Environment and Energy, 2016).

De luftforurenende stoffer stammer fra forskellige kilder, hvor NO_x emissioner i høj grad fremkommer fra vejtransport, som alene udgør omkring 40 % af den samlede NO_x forurening. Samtidig har NO_x niveauet, mod forventning, været forholdsvis stabilt i de senere år, hvilket særligt skyldes øget transport fra blandt andet dieselmotorer, som emitterer mere NO_x end benzindrevne motorer, ligesom den ringere effekt end ventet af katalysatorer på særligt nyere motorer også har været en bidragsyder i udviklingen (European Environment Agency, 2016). Sidstnævnte bevirker også, at NO_x emissionerne i de fleste EU-lande er underestimeret da motorer forurener mere end tidligere antaget.

Figur 2: Hvor kommer NO_x fra



Kilde: (Institut for miljøvidenskab, 2017)

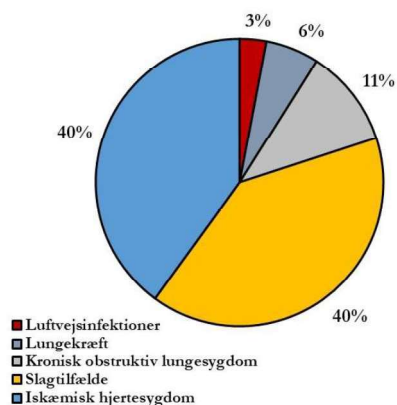
2.1. Luftforurenings effekt på sundhed

Luftforurening medfører hvert år mere end 7 millioner præmature dødsfald, hvor 3 millioner forekommer som følge af udendørsluftforurening. Dette bevirker, at luftforurening er en af de største primære kilder til uundgåelige dødsfald. Alene i EU er dette tal 10 gange højere end antallet af dræbte i trafikken per år, hvormed luftforurening udgør en af verdens største trusler mod menneskeheden (United Nations, 2016).

De præmature dødsfald som luftforureninger afstedkommer, medfører talrige sygdomme, herunder at være en af de største direkte kilder til ikke-smitsomme sygdomme. Dette skyldes, at de sundhedsmæssige konsekvenser af luftforurening ikke kun er eksisterende, når de fastsatte grænseværdier overskrides. Disse forekommer også ved lave koncentrationer og særligt når koncentrationerne er vedvarende, hvormed det er estimeret, at over 90 % af verdens befolkning i dag er eksponeret mod luftforurening og dets fatale følger (United Nations, 2016).

Særligt børn i aldersgruppen 0-2 år samt den ældre del af befolkningen er i risikofare for luftforureningens mange sygdomsmæssige følger (World Health Organization, 2017). Herunder udgør hjertesygdomme og slagtilfælde de hyppigste efterfulgt af kroniske lungesygdomme og lungekræft, som illustreret i figur 3. Desuden er luftforurening også bidragsyder til astma, diabetes, præmature fødsler, letvægtsbørn samt en hæmmet udvikling af nerverne (United Nations, 2016).

Figur 3: Sygdomme der forårsages af luftforurening



Kilde: World Health Organization, 2014

NO_x er den skadeligste luftforurener for mennesker og natur, og er primær kilde til ovennævnte sygdomme og lidelser. Sidstnævnte uddybes nærmere i kap. 3. Behovet for en bedre kontrol og regulering af luftforurening, herunder særlig NO_x gasser, som er baseret på en alsidig værktøjskasse, synes rettidigt. Dette til trods for at den overordnede NO_x koncentration er faldet sammenlignet med koncentrationerne for få årtier siden (United Nations, 2016).

2.2. Regulering og lovgivning

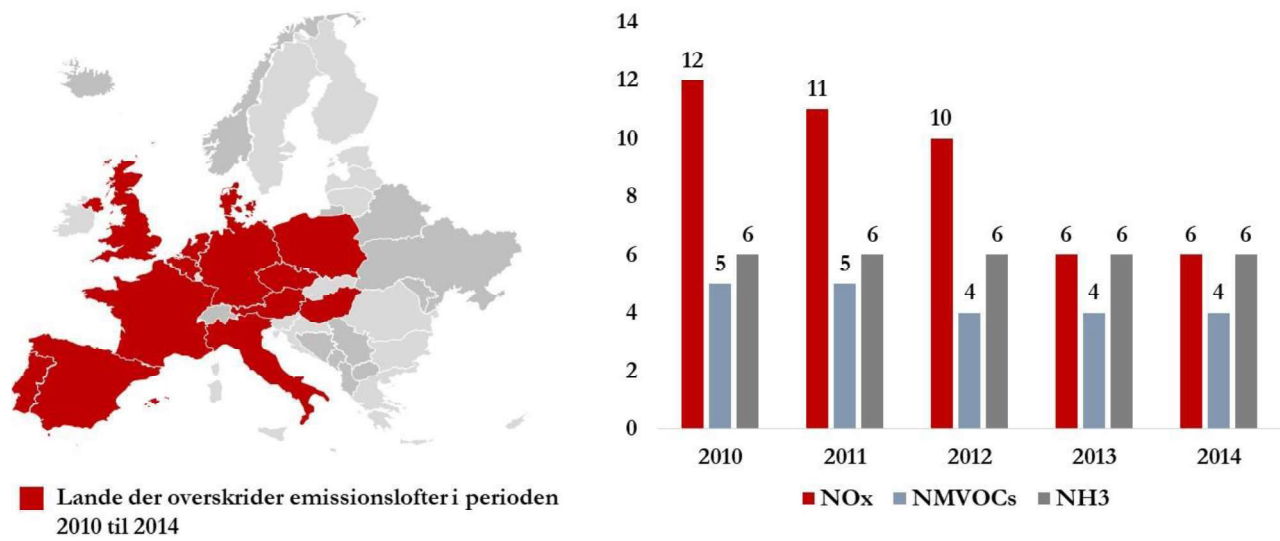
Luftforurening reguleres i flere EU-direktiver, hvorunder det senest reviderede er det såkaldte National Emission Ceiling (NEC) Directive 2008/50/EF, som fastsætter nationale reduktionsmål for de luftforurenende stoffer. Baggrunden for NEC-direktivet var at reducere luftforurening gennem en international indsats, grundet at luftforurening ikke er begrænset af landegrænser. Den nylige revision af direktivet er blevet strammet op og indeholder blandt andet nye nationale reduktionsmål for henholdsvis 2020 og 2030. Desuden foreskriver NEC-direktivet, at medlemsstater skal inddeles i selvangivne zoner for at kunne vurdere og kontrollere luftkvaliteten. Herunder eksisterer der særlige zoner for såkaldte agglomerationsområder, som omfatter byområder med en befolkning på mere end 250.000 indbyggere (Den Europæiske Unions Tidende, 2016). Således er direktivet iværksat på baggrund af et ønske om at reducere den grænseoverskridende luftforurening.

I Danmark er Miljøstyrelsen den ansvarlige institution for vurdering af og kontrol med luftkvaliteten. De fastsatte grænseværdier for de luftforurenende stoffer fremgår af et andet EU-direktiv, som udelukkende forholder sig til nitrogendioxid, Direktiv 85/203/EØF. Direktivet er revideret flere gange og indeholder fastsatte universelle værdier omhandlende at NO_x koncentrationen ikke må overstige 200 µg/m³ på timebasis mere end 18 gange om året, mens det årlige dagsgennemsnit ikke må overskride 40 µg/m³. Danmark overskrider i dag ikke disse krav, men oplever stadig store omkostninger relateret til luftforurening, herunder både samfundsøkonomiske og sundhedsmæssige følger (Danish Center for Environment and Energy, 2016).

Flere EU-lande, heriblandt de største økonomier i EU, oplever derimod problemer med at overholde de respektive grænseværdier (European Commission, 2017). Dette har en afsmittende negativ effekt på Danmarks luftkvalitet, da omkring halvdelen af den eksisterende luftforurening som danskere eksponeres mod, stammer fra andre europæiske lande (Danish Center for Environment and Energy, 2016). I alt overskrider 23 ud af EU's samlede 28 medlemsstater en eller flere af de fastsatte grænseværdier. Kigger man isoleret på antallet af overtrædelser af grænseværdierne i byer, forekommer disse i mere end 130 byer (European Commission, 2017). Det er derfor EU Kommissionens anbefaling, at der intensiveres en mere målrettet tilgang til at overholde de fastsatte grænseværdier på både lokalt, regionalt og nationalt plan til gavn for alle medlemsstater og herigennem alle EU's borgere (European Commission, 2017).

De kontinuerligere overskridelser fra flere medlemsstater har desuden bevirket, at EU Kommissionen har sendt såkaldte åbningsskrivelser til 12 medlemslande grundet deres overtrædelse af NO₂ koncentration. Åbningsskrivelser udgør et retsligt grundlag omhandlende, at såfremt grænseværdierne ikke sænkes i nedenstående lande vil de idømmes bøder for deres overskridelser. De 12 medlemslande er: Østrig, Belgien, Tjekkiet, Danmark, Frankrig, Tyskland, Ungarn, Italien, Polen, Portugal, Spanien og Storbritannien. Luftforurening bidrager hermed til yderligere meromkostninger, hvilket understreger behovet for at aktivere en indsats af både sundheds- og økonomiske årsager. Sidstnævntes uddybes nærmere i det følgende kapitel.

Figur 4: Lande der overskred emissionslofter for NO_x, NMVOCs og NH₃, 2010-2014



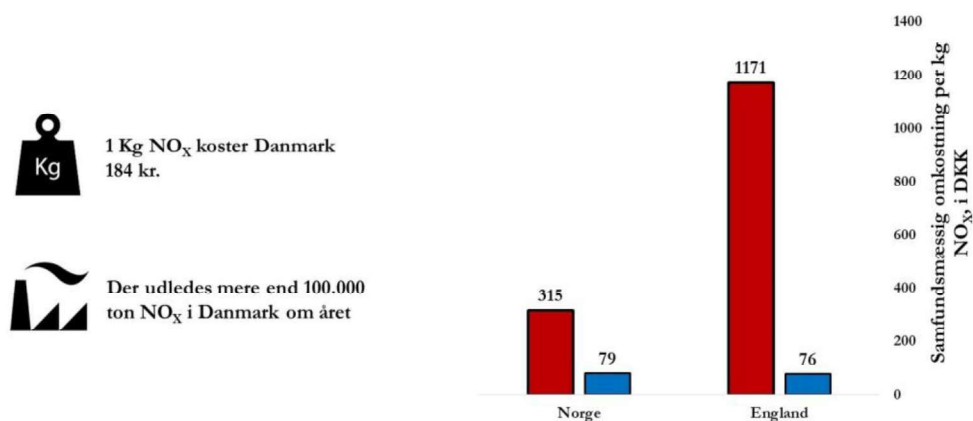
Kilde: European Commission, 2017

3. Samfundsmæssige omkostninger relateret til luftforurening

Luftforurening foranlediger, som tidligere angivet, store samfundsmæssige omkostninger. Idet luftforurening består af forskellige forurenende stoffer, er der ligeledes en variation i deres bidrag til de samfundsmæssige omkostninger. NO_x er herunder en stor bidragsyder med både en lokal og regional/national effekt. Den lokale effekt kommer af direkte eksponering af NO₂ som er en toksisk gas, den regionale effekt kommer af NO_x sit bidrag til dannelsen af NH₄NO₃ partikler.

Den største koncentration af NO_x forefindes i byer og meget trafikerede områder, hvilket særligt skyldes, at den største bidrager til NO_x emissioner er vejtransport, som forekommer mere i byerne grundet den større befolkningstæthed. Nogle lande estimerer, luftforurening koster mere de steder, hvor befolkningstætheden er stor. I Norge er det estimeret, at NO_x forurening fra trafik koster DKK 315 per kg NO_x i byer med mere end 100.000 indbyggere, hvorimod det i byer med færre indbyggere udgør en omkostning på DKK 79 per kg NO_x (Transportøkonomisk institutt: Stiftelsen Norsk senter for samferdselsforskning, 2014). Et lignende estimat er foretaget i Storbritannien, hvor det anslås at uden for byerne koster ét kg NO_x ca. DKK 76, mens det i London koster ca. DKK 1.171 (Department for Environment, Food & Rural Affairs, 2015). Hvis beregningerne fra henholdsvis Norge og Storbritannien tegner et universelt billede, er NO_x forureningen ikke alene større i byer og tættrafikerede områder, den udgør også en større samfundsmæssig meromkostning per kg.

Figur 5: Samfundøkonomiske omkostninger relateret til NO_x

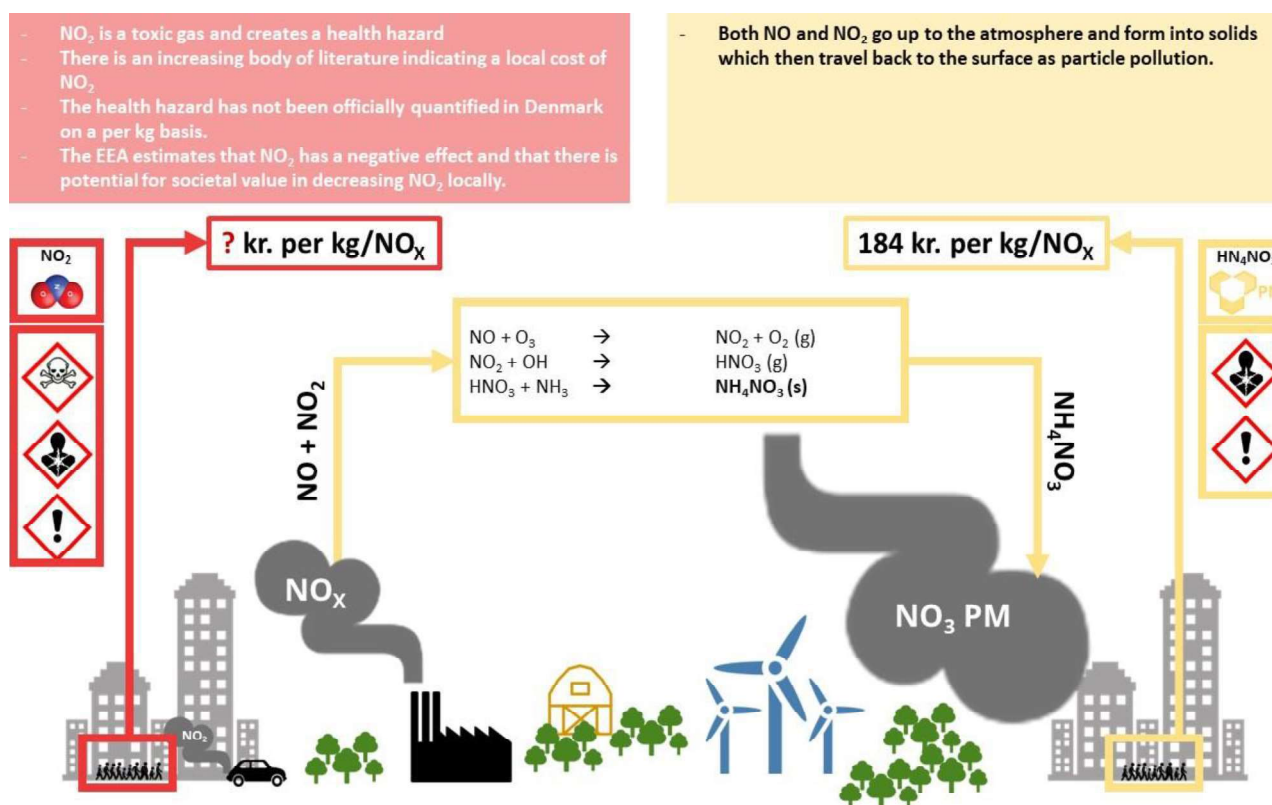


Kilder: (Transportøkonomisk institutt: Stiftelsen Norsk senter for samferdselsforskning, 2014; Department for Environment, Food & Rural Affairs, 2015; Danish Center for Environment and Energy, 2016)

I Danmark beregnes den samfundsøkonomiske værdi fra NO_x forurening, ud fra bidraget til dannelsen af NH₄NO₃ globalt og er estimeret til 184 kr./kg. (Danish Center for Environment and Energy, 2016). Denne estimering er baseret på en nu forældet værdisætning af et statistisk liv i Danmark sat af Finansministeriet til 18 mio. kr. Denne værdisætning er nu opdateret til 32 mio. kr. for et statistisk liv og 1300 t.kr. for et statistisk tabt leveår. Derfor vil vurderingerne af de samfundsøkonomiske omkostninger blive opjusteret.

EEA vurderer, at der er en lokalt skadelig effekt fra NO₂ (European Environment Agency, 2017). For at tage højde for denne skade, har Photocat estimeret lokale omkostninger som følge af NO₂ eksponering til at ligge mellem 56 kr. og 164 kr. per kg/NO_x. Dette kommer fra EEAs egen vurdering af den samfundsøkonomiske effekt i Danmark for at nedbringe NO₂ fordelt på lokale emissioner i en stor dansk by på 100.000 indbyggere.

Figur 6: NO_x og dens skadevirkninger lokalt [NO₂] og globalt [NH₄NO₃]

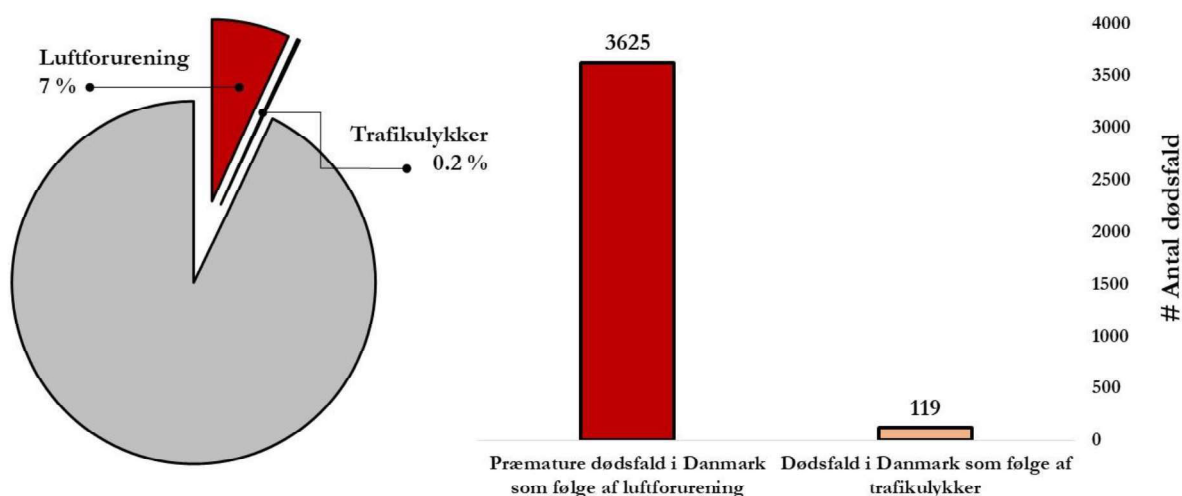


Kilder: (Danish Center for Environment and Energy, 2016; Danish Centre for Environment and Energy, 2014; European Environment Agency, 2017)

3.1. Luftforurening i Danmark

Luftforureningen i Danmark består, som tidligere nævnt, af en ligelig fordeling af både internationale og nationale kilder og udgør mere end DKK 27,3 mia. i danske sundhedsomkostninger samt mere end 3.500 præmature dødsfald årligt. Heraf er NO_x den tungeste udgift, da den bidrager med omkring 69,7 %, hvorimod PM_{2.5} bidrager med ca. 24,6 %, SO_x med omkring 5,7 % og CO med under 1 % (Danish Center for Environment and Energy, 2016).

Figur 7: Dødsfald i Danmark som følge af luftforurening i 2013

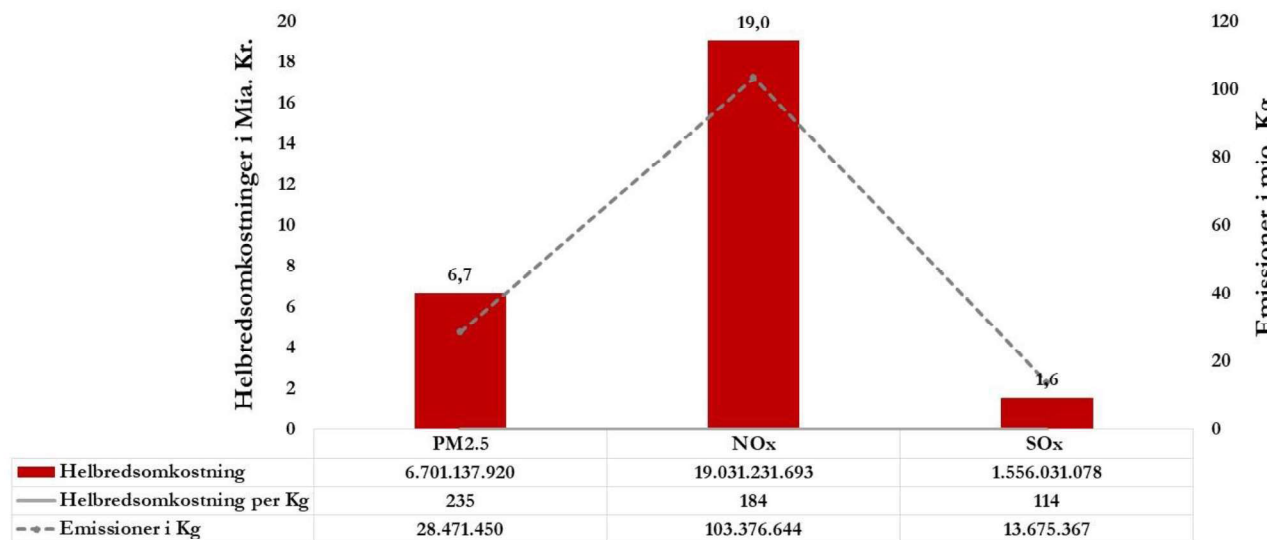


Kilde: Danmarks Statistik, 2013 og Danish Center for Environment & Energy, 2016

De danske emissioner af NO_x, PM_{2.5}, SO_x og CO udgjorde i 2015 henholdsvis 103,4 ktons, 28,5 ktons, 13,7 ktons og 388,5 ktons (Danish Center for Environment and Energy, 2016, s. 44-47). Heraf var NO_x forureningen den største omkostning og udgjorde omkring 19 mia. kr. NO_x er hermed den største samfundsøkonomiske belastning inden for luftforurening og dette til trods for at grænseværdierne generelt overholdes i Danmark. For PM_{2.5}, SO_x og CO er tallene henholdsvis 6,7 mia. kr., 1,6 mia. kr. og 2,8 mio. kr. (2016). I 2017 blev værdien af et statistisk liv opjusteret fra 18 mio. kr. til 32 mio. kr., hvilket betyder, at den samfundsøkonomiske belastning skal opjusteres.

I 2013 var udledningen af NO_x, PM_{2.5}, SO_x og CO estimeret til henholdsvis 124,4 ktons, 21,2 ktons, 13,7 ktons og 338,9 ktons. Hermed er det estimeret, at NO_x emissionerne er faldet med 16,9 %, PM_{2.5} er steget med 34,4 %, SO_x er hverken steget eller faldet og CO er steget med 14,6 %.

Figur 8: Samlede emissioner fra danske kilder og medførende eksterne omkostninger



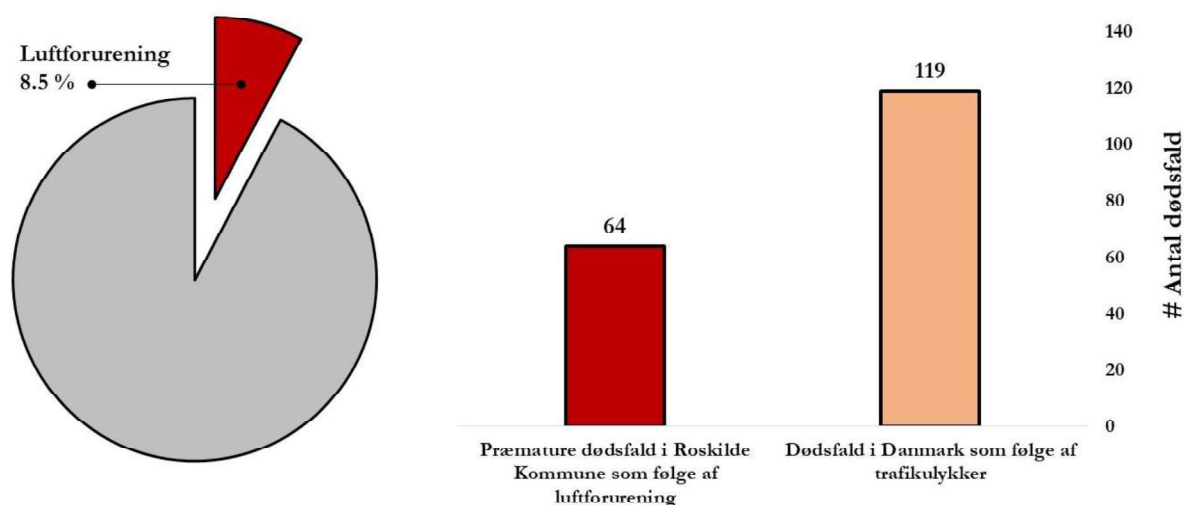
Kilde: Danish Center for Environment & Energy, 2016

3.2. Luftforurening i Roskilde kommune

I 2014 publicerede Nationalt Center for Miljø og Energi en rapport, omhandlende luftforurening og helbredseffekter i Roskilde Kommune. Af rapporten fremgår det, at luftforurening alene i Roskilde kommune årligt medfører 64 præmature dødsfald samt er ene bidrager til omkring 500 mio. kr. om året i samfundsmæssige omkostninger (Danish Centre for Environment and Energy, 2014, s. 9). Hermed var ca. 8,5 % af dødsfaldene i Roskilde kommune i 2010 foranlediget af luftforurening (Danmarks Statistik, 2017).

De største koncentrationer af NO_x i Roskilde Kommune findes i Roskilde by og nordøst for Roskilde (Danish Centre for Environment and Energy, 2014, s. 12). Årsmiddelværdien for Jernbanegade i Roskilde er estimeret til at ligge på omkring 38 µg/m³ og befinder sig hermed kun lige akkurat under grænseværdien (Danish Centre for Environment and Energy, 2014, s. 13). Ikke desto mindre medfører NO_x forurening fortsat store samfundsøkonomiske omkostninger for Kommunen. I det følgende kapitel vil et af instrument til at nedbringe NO_x -luftforurening blive beskrevet.

Figur 9: Dødsfald i Roskilde Kommune som følge af luftforurening i 2013



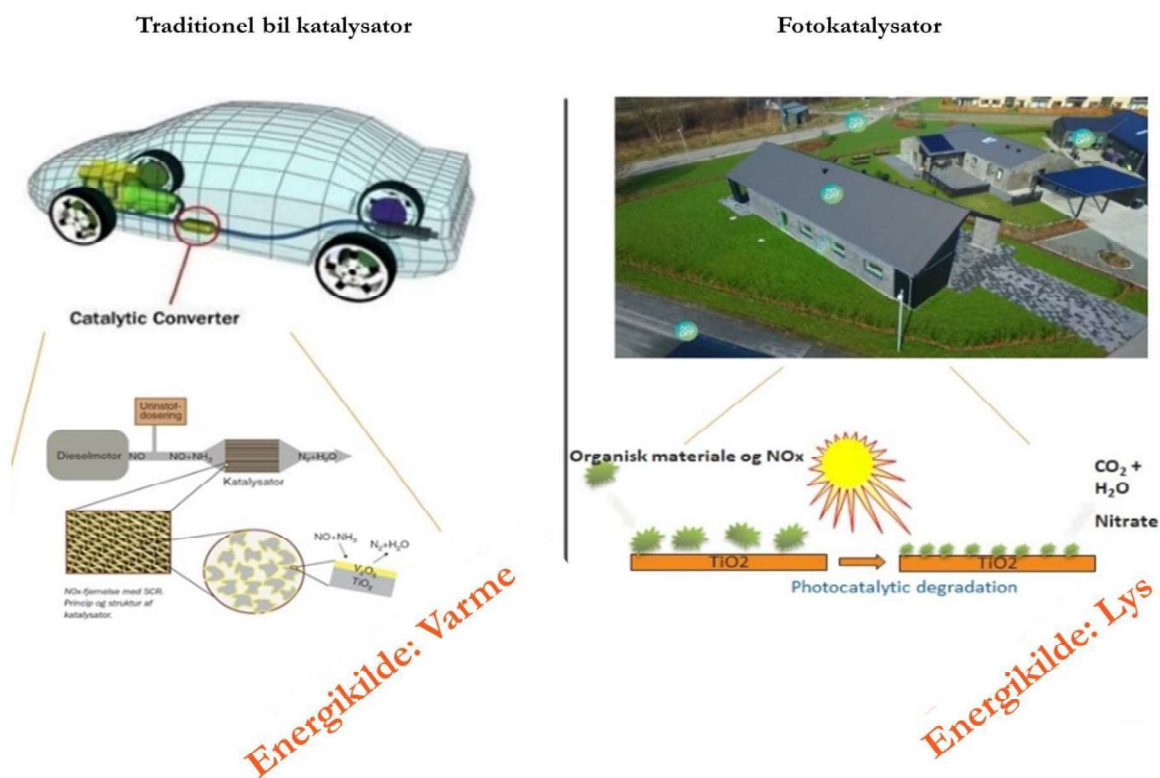
Kilde: Danmarks Statistik, 2010 og Danish Center for Environment & Energy, 2014

4. Den Fotokatalytiske Teknologi

Fotokatalyse er en katalytisk proces, hvorved der anvendes et katalytisk materiale, som aktiveres ved hjælp af lys. Når katalysatoren aktiveres, er den i stand til at oxidere organisk materiale samt uorganiske stoffer såsom NO_x. Denne oxidation medfører, at man ved brug af den fotokatalytiske proces kan fjerne giftige luftbårne stoffer som NO_x og oxidere dem til ufarlige mineralske materialer, hvor det i tilfældet med NO_x vil blive oxideret til nitrat.

Den fotokatalytiske proces er meget sammenlignelig med processen i en bilkatalysator. I bilkatalysatoren opsamles den NO_x, der dannes fra bilens forbrændingsmotor. Denne NO_x reduceres til N₂ vha. en katalysator og anvender varme som energikilde. I den fotokatalytiske proces omdannes NO_x til nitrat, når NO_x gassen rammer fotokatalysatoren og hvor der er lys til stede som energikilde. Begge processer er katalytiske processer til fjernelse af NO_x, hvor den store forskel ligger i energikilden, som anvendes; varme til bilkatalysatoren og dagslys til fotokatalysatoren. Den fotokatalytiske proces forløber derfor udelukkende med naturens egen ressource i form af solen som energikilde.

Figur 10: Skematisk beskrivelse af to kommercielle katalysatorer til brug for fjernelse af NO_x

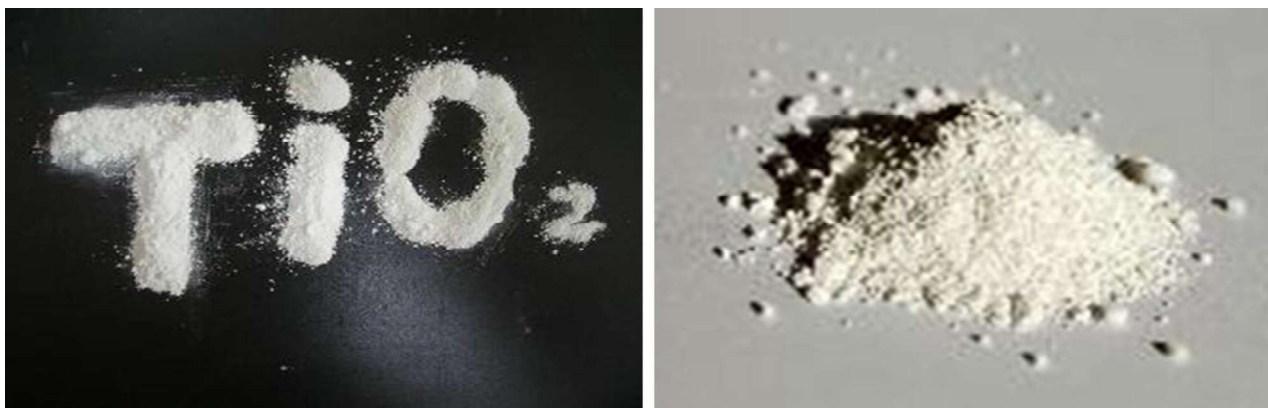


Kilde: Udarbejdet af Photocat A/S

TiO₂ er det mest anvendte fotokatalytiske materiale, hvilket særligt skyldes dens høje effektivitet, lave pris samt at TiO₂ er et ikke-giftigt materiale (Aitken, Creely, & Tran, 2004) (SCCNFP, 2000).

Traditionelt anvendes TiO₂ som pigment i maling, pigment til polymere og i papir. Størstedelen anvendes som hvidt pigment i maling. Anvendelsen af TiO₂ som hvidt pigment har været kendt og kommercielt produceret siden 1920 (Manuel Jesús Gázquez, 2014), og TiO₂ bliver især anvendt i malingsindustrien pga. de gode dispergerings egenskaber. Derudover er TiO₂ meget anvendt, da det er toksikologisk sikker og udviser inerte miljømæssige egenskaber (Semmler & Proft, 2004).

Figur 11: TiO₂ som hvidt pulver. Det mest anvendte pigment i hvid maling.

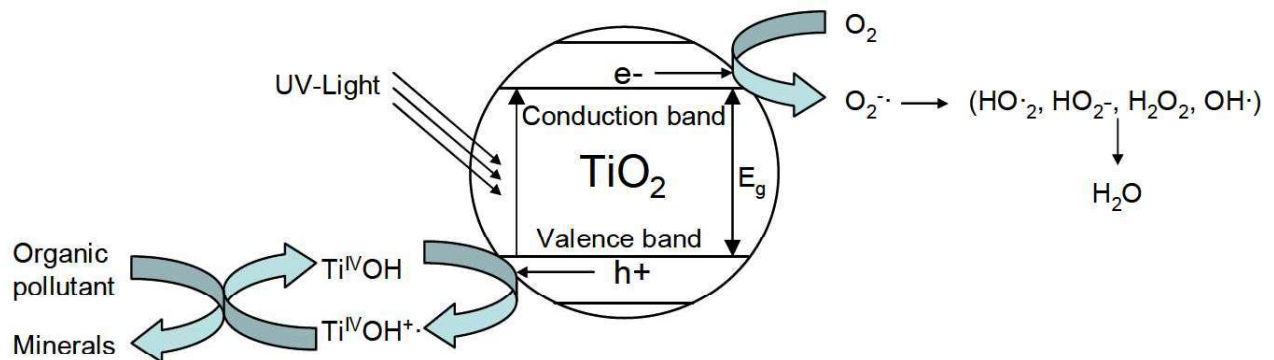


Kilde: Udarbejdet af Photocat A/S

TiO₂ kan også opgraderes til, hvad der betegnes som mikroniseret TiO₂, der indeholder helt nye anvendelsesmuligheder, som f.eks. til fotokatalytiske processer. Opgradering af TiO₂ til fotokatalytiske processer sker ved, at TiO₂ omdannes fra den amorfe form, der er anvendelig til maling, til den krystallinske form, hvor gitterstrukturen er ordnet og hvorved halvleder egenskaber opnås. Det er de krystallinske halvleder egenskaberne af TiO₂, der danner grobund for den fotokatalytiske proces.

Selve processen hvormed TiO₂ aktiveres ved lys kan kort skitseret, som illustreret i nedenstående figur:

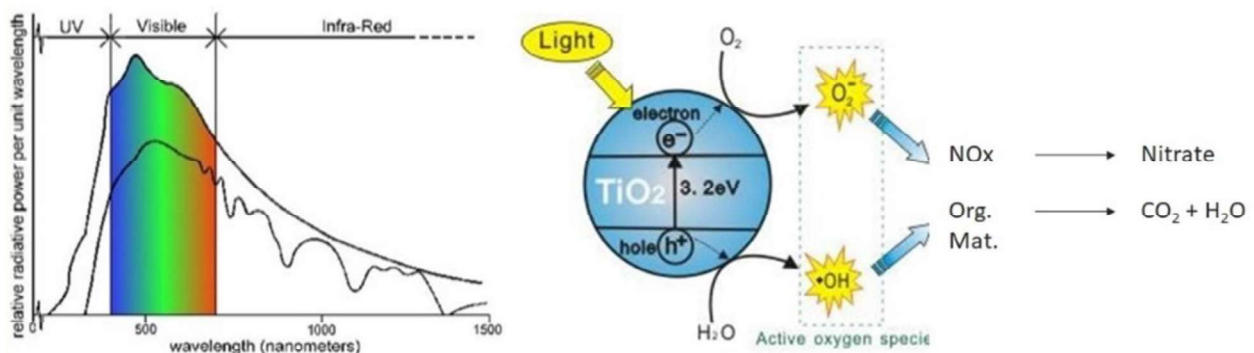
Figur 12: Princippet bag fotokatalyse og aktivering af TiO₂ katalysatoren



Kilde: Udarbejdet af Photocat A/S

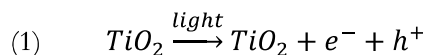
Først bliver TiO₂ katalysatoren belyst med lys med en energi større en båndgabet mellem valensbåndet og ledningsbåndet, som oftest UV lys. Båndgabet for TiO₂ afhænger af krystalstrukturen. Oftest anvendes TiO₂ i anatas formen, da den er mest stabil. Båndgabet for TiO₂ i anatasformen er 3,2 eV, hvilket er tilsvarende energien i UVA lys. Det vil sige lys med en bølglængde på under 388 nm, hvilket svarer til energien i UVA lys. Det vil sige lys med en bølglængde på under 388 nm, hvilket svarer til alt UV lys, vil have nok energi til at aktivere TiO₂ katalysatoren. I Danmark er det i gennemsnit 5 % af det indkommende sollys (Eriksen, 2007), på ca. 1.000 kWh/m² (JyskSolenergi, 2008), der er i UV området og derved anvendelig for den fotokatalytiske proces.

Figur 13: Båndgabet for TiO₂ på anataseformen og tilsvarende sollys spektrum

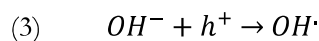
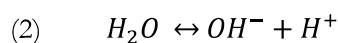


Kilde: Udarbejdet af Photocat A/S

Ved fotokatalytisk oxidation induceres overførslen af elektroner fra valensbåndet til ledningsbåndet ved anvendelse af lys, hvilket oftest er UVA lys. Belysningen af TiO₂ katalysatoren gør det muligt at excitere en elektron fra valensbåndet op i ledningsbåndet. UVA absorptionen danner et såkaldt elektron/hul par, som medfører dannelsen af OH radikaler og ladede stoffer (OH⁻, O₂⁻, HO₂⁻). Dannelsen af hydroxyl radikaler (OH[•]) kommer fra tilstedeværelsen af vand på overfladen af TiO₂. Til dette formål er en vis mængde vand nødvendig og den mængde vand kommer fra den relative luftfugtighed (Hüsken, Hunger, & Brouwers, 2009). Selve aktiveringen af TiO₂ og dannelsen af et elektron/hul par kan skrives som:

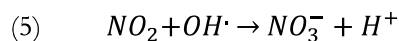
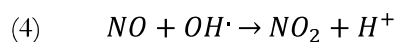


Ved tilstedeværelsen af vand på TiO₂ overflader og det positive hul i valensbåndet dannes der OH⁻ radikaler:



De dannede hydroxyl radikaler, OH[•], kan agere som stærke oxidanter for organiske og uorganiske stoffer. Hydroxyl radikaler er de mest reaktive oxidanter efter flour (Hüsken, Hunger, & Brouwers, 2009).

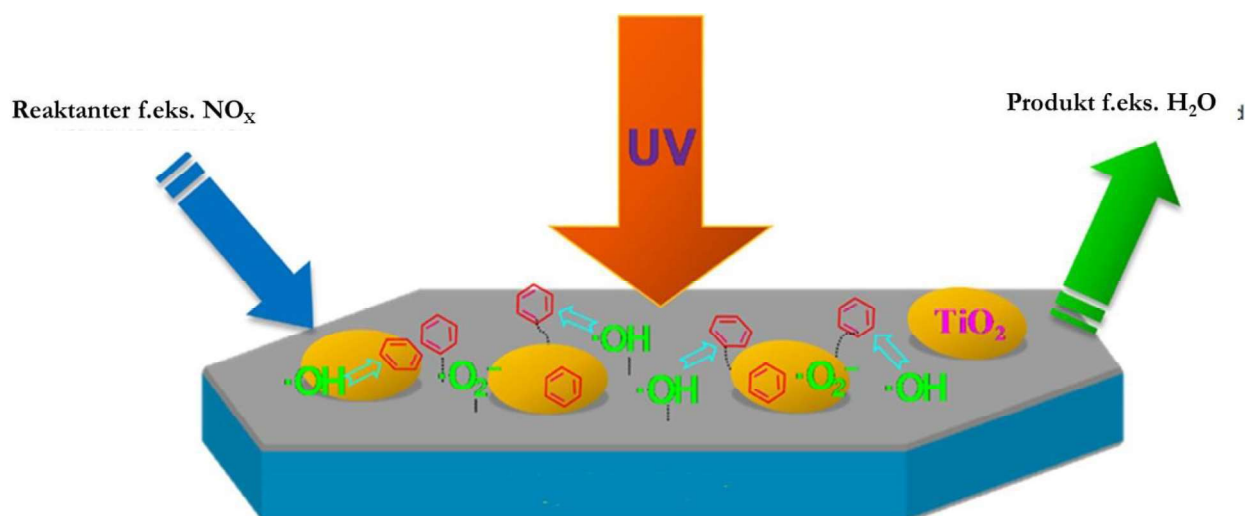
Den videre oxidation eller reaktion mellem de stærke OH[•] radikaler og forureningsstoffer, såsom NO_x, forløber som følgende:



NO_x er defineret som mængden af NO og NO₂ til sammen og ligning (4) og (5) viser den samlede omdannelse af NO_x til nitrat. Reaktionerne i ligning (4) og (5) viser, at NO bliver oxideret til NO₂ før NO₂ bliver færdig oxideret til nitrat (NO₃⁻).

Som nævnt, er reaktionen i oxidationen af NO_x (ligning (4) og (5)) katalyseret af TiO₂, som er en heterogen katalysator. Heterogen katalyse er en katalytisk proces, hvor katalysatoren er en væske eller fast materiale og reaktanter samt produkter er i gasfasen. Den fotokatalytiske proces er heterogen, da materialet, som udgør katalysatoren, ikke er i gasfase men derimod et faststof, og NO_x forureningen i luften er i gasfase, se nedenstående figur, hvor reaktanterne, forureningsstofferne, er på gasform og rammer katalysatoren, som er på fast form (Chinese Journal of Catalysis, 2010).

Figur 14: Fotokatalyse er en heterogen proces



Kilde: Udarbejdet af Photocat A/S

Katalyse er per definition en acceleration af en proces, hvori katalysatoren ikke selv konsumeres. Det betyder, at fjernelsen af NO_x sker ved at katalysatoren, TiO₂, aktiveres af sollys, ligning (1). Dette danner OH radikaler, som oxiderer NO_x til nitrat, ligning (4) og (5). I denne proces sker der en excitering af TiO₂ krystallen. Efter en færdigløbet proces vil TiO₂ være tilbage på samme stadie som før reaktionen, og en ny proces kan forløbe, der starter med excitation ved sollys. Denne proces er vedvarende og kan forløbe igen og igen da TiO₂ ikke bliver opbrugt, hvormed processen forløber så længe TiO₂ eksponeres mod sollys.

Kinetikken af en kemisk reaktion kan være stærkt afhængig af startkoncentration af en eller flere reaktanter. Derudover afhænger reaktionshastigheden af temperaturen, hvormed reaktionen sker og gennemstrømningshastigheden af reaktanterne. Desto større flow af gassen, desto flere reaktanter har mulighed for at kolliderer med overfladen af katalysatoren, hvorimod færre reaktanter vil nå at adsorbere på overfladen længe nok til at reagere, før de desorberer fra overfladen som produktet af reaktionen.

Den fotokatalytiske nedbrydelse af NO_x følger en første ordens kinetik (Laufs, et al., Conversion of nitrogen oxides on commercial photocatalytic dispersion paints, 2010). Det vil sige, at koncentrationen af NO_x afhænger eksponentielt af reaktionstiden. For en reaktion der følger første ordens kinetik, kan man bestemme en første ordens reaktions koefficient (k) ud fra eksperimentelle forsøg (Ifang, et al., 2014).

$$(6) \quad k_{\text{rxn}} = -\frac{\ln(\frac{c_t}{c_0})}{t_{\text{rxn}}}$$

Hvor k_{rxn} er førsteordens reaktionskoefficienten, t_{rxn} er tiden gassen (f.eks. NO_x) er i cellen og c_t og c_0 er hhv. slut og start koncentrationen af NO_x.

Reaktions koefficienten (k) er direkte relateret til den enkelte overflades aktivitet. Det vil sige, at med dobbelt aktivitet vil koefficienten være dobbelt så stor. Koefficienten er desuden uafhængig af start koncentration, lufthastigheden og reaktionstiden i forsøgscellen (Ifang, et al., 2014). Dette vil gælde, så længe reaktionen er en førsteordens reaktion. Denne første ordens reaktions koefficient er dog ikke uafhængig af geometrien for forsøgsopstilling, hvilket vil sige forsøgscellen. Det betyder, at hvis det fotokatalytiske aktive overfladeareal forandres i forhold til cellens volumen, så kan forskellige forsøgsreaktionskoefficienter ikke sammenlignes. Derfor har Finlayson-Pitts og Pitts (Finlayson-Pitts & Pitts, 2000) beskrevet en enhedsløs størrelse γ , også kendt som "uptake" koefficienten, som er uafhængig af de førnævnte parametre og geometrien af forsøgscellen. Direkte sammenligninger af forskellige fotokatalytiske produkter er nu mulige. Uptake koefficienten er et udtryk for, hvor mange kollisioner reaktanterne har med overfladen og som fører til en reaktion til produkter, mod hvor mange kollisioner der er i alt i mellem reaktanterne og overfladen.

$$\gamma = \frac{4k_{\text{rxn}}}{v \cdot S_{\text{aktiv}}/V}$$

Hvor γ er uptake koefficienten, k_{rxn} er den tidligere nævnte førsteordens reaktionskoefficient, S_{aktiv} er det fotokatalytiske aktive overfladeareal, V er volumen gassen bevæger sig igennem og v er den gennemsnitlige molekylære hastighed fra almindelig kinematisk gasteori (Finlayson-Pitts & Pitts, 2000)

$$v = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}}$$

Hvor R , T og M er den universelle gaskonstant, temperaturen og molarmassen af reaktanterne. Uptake koefficienten(γ) vil i denne rapport blive brugt til at sammenligne og evaluere test foretaget i laboratoriet mod real-life test. Derudover vil uptake koefficienten blive anvendt til at følge udviklingen over tid af den fotokatalytiske behandling på parkeringspladserne for derigennem at evaluere holdbarheden af den anvendte teknologi som funktion af slid og vejrlig.

4.1. Fotokatalyse i det nære byrum

Fotokatalyse er, som tidligere angivet, en forholdsvis gammel teknologi, som først blev opdaget i 1960'erne og senere rapporteret af to japanske forskere (Prof. A. Fujishima og Prof. K. Honda) i 1972, hvor de som de første viste, at en fotokatalysator kan spalte vand under belysning fra solen (Fujishima & Honda, 1972). Teknologien fik dog først sit store gennembrud i 1990'erne, da en gruppe under Prof. A. Fujishima opdagede, at den selvsamme fotokatalysator har en selvrensende effekt. I dag er den fotokatalytiske teknologi veldokumenteret og i Asien er det et milliardmarked. I Europa er teknologien så småt ved at vinde indpas og store industrier har nu set 'lyset', hvormed fotokatalyse i dag anvendes indenfor så forskellige brancher som: tagpap, folier, glas, gulve samt beton. I betonbranchen har den kommercielle succes først vundet frempas med den nyere version af teknologien, da denne muliggør at påføre fotokatalysatoren meget specifikt og kun i det område, hvor den virker, hvilket er i overfladen af betonmaterialet. Herved opnås en meget højere aktivitet end, hvad tilfældet var med de tidligere versioner, hvor katalysatoren blev blandet i hele cementen, hvilket medførte en relativ lille effekt.

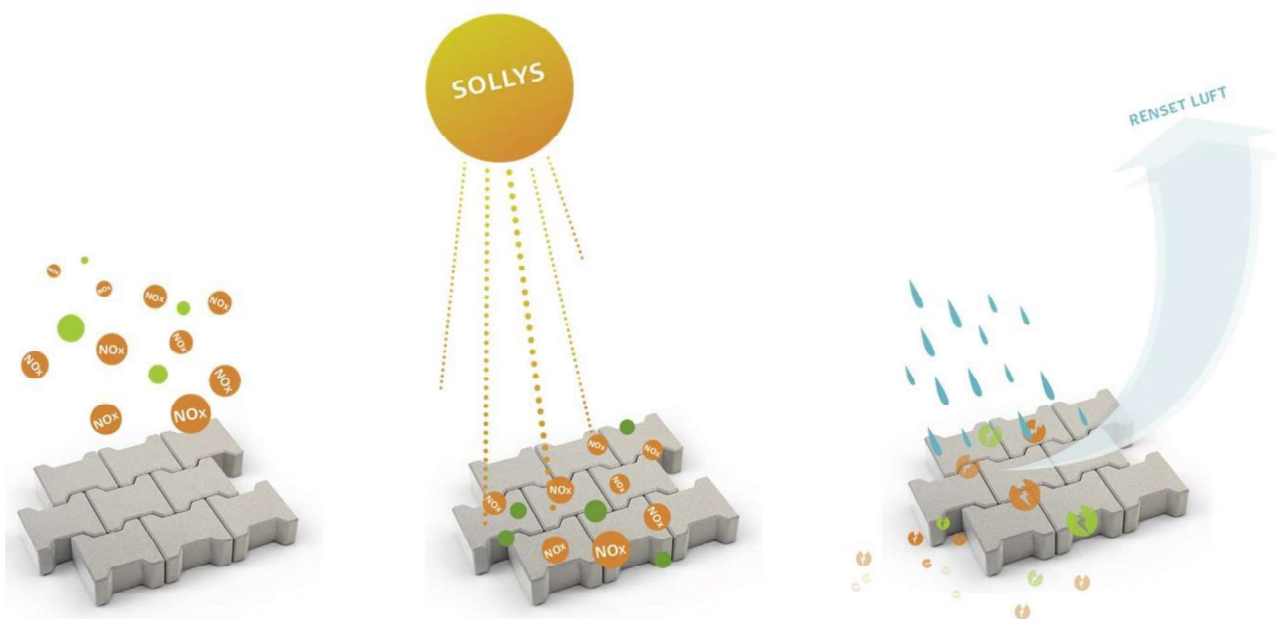
I Danmark er vi langt fremme indenfor fotokatalyse som et middel mod luftforurening, men det er især Japan, der i den tidlige fase har drevet udviklingen og kommercialiseringen af den fotokatalytiske teknik. Indenfor de sidste 5-7 år er flere store demonstrationsforsøg blevet publiceret, som viser, at ikke bare på laboratorieplan men også ude i den virkelige verden, virker teknologien. Blandt andet er teknologien blevet demonstreret i Holland (Castoweg – Hengelo 2008-2011 og Schipol lufthavn 2009-2010), England (London – High Holborn 2007-2010) og Sverige (Malmö – Admiralsgaten 2009-2010) (Barratt, Carslaw, & Green, 2010) (Ballari & Brouwers, 2013) (Nilsson & Häger, 2010). Senest er to store demonstrationsforsøg med dansk deltagelse blevet gennemført og alle viser, at fotokatalyse faktisk gør en forskel med hensyn til at nedbringe NO_x forureningen i de danske byer. I et demonstrationsforsøg under Fornylesesfoden, hvis resultater er baggrunden for denne rapport, viste Photocat i 2013, at på en parkeringsplads i Københavns lufthavn (P8), som fik installeret nye NO_xOFF behandlede belægningssten, blev NO_x forureningen reduceret med 13 % i gennemsnit og op til 24 % i den mest lysintensive periode på dagen (Jensen 2013, præsentation til seminar med Dansk Selskab for Materialeteknologi). 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).

Danmark går for at være et af de mest grønne lande i verden. Mange grønne teknologier har enten sit udspring eller er blevet videreudviklet til kommercielt brug i Danmark. Fotokatalyse er en af disse teknologier, hvor innovative tilgange til eksisterende teknologier har givet en 'cutting edge'. Med fotokatalyse drives visionen om at bruge byggematerialer aktivt i byrummet og derigennem anvende de store overflader i bybilledet, som normalt står passive. Hermed kan byggematerialer gøres aktive og blive en del af en overordnet strategi omhandlende, at overkomme de udfordringer en storby genererer ved at anvende aktive overflader. Med de sidste 10 års udvikling og dokumenteret virkning af den fotokatalytiske teknologi, både i laboratoriet men også i den virkelige verden, står

denne teknologi overfor at skulle bruges som et aktivt instrument til at nedbringe NO_x forureningen i byer verden over.

Princippet bag den aktive by med fotokatalyse som en aktiv medspiller er at indtænke denne løsning i al renovering og nybyggeri. Når der f.eks. anlægges et nyt fortov specificeret med fotokatalyse, vil det være endnu et stort skridt mod at afhjælpe de store problemer med NO_x forurening i f.eks. de store byer i Danmark ved aktivt at inddrage den måde vi lever og bor på. I den følgende figur er princippet bag en fotokatalytisk aktiv fortovsoverflade vist.

Figur 15: Princippet bag fotokatalytiske fortovsoverflader



Kilde: Udarbejdet af Photocat A/S

Fotokatalytiske byggematerialer findes allerede i form af betonelementer, såsom belægningssten, tagpap, facader og glas. Disse fotokatalytiske byggelementer er påført den fotokatalytiske teknologi som sidste led i produktionen. Det betyder, at når disse byggelementer installeres i byrummet, vil NO_x forureningen ramme overfladerne. Når sollys rammer overfladerne ændres de til aktive luftrensere, der ved hjælp af naturens egne ressourcer såsom sol og luftfugtighed omdanner NO_x til ufarligt nitrat, som bliver vasket væk med regnvandet.

Kigger vi på byen som case, vil der i en normal storby være forskellige kilder til NO_x forureningen. Det være sig kraftværker og produktionsfabrikker, men den største udleder af NO_x er transportsektoren. I en normal storby frigives NO_x, hvormed de mennesker der færdes i byrummet bliver eksponeret for den giftige gas. Efter denne eksponering mod mennesker fortsætter NO_x'en op i atmosfæren, hvor den ved hjælp af ozon bliver omdannet til nitrat og derefter syrerregn, som rammer by og land med de deraf følgende skadevirkninger.

Indtænkes fotokatalyse som en del af byrummet, vil selve NO_x cyklussen se anderledes ud. I byen vil der fortsat ske en afbrænding af fossile energikilder, hvilket medfører dannelsen af NO_x. Men hvor NO_x normalt vil blive eksponeret mod mennesker og dyr, bliver NO_x'en i den aktive by nedbrudt af den fotokatalytiske teknologi i symbiose med naturen (sol og luftfugtighed) før NO_xen når at forvolde skade på mennesker, dyr, miljø og bygninger.

Kort fortalt er den fotokatalytiske proces en acceleration af den naturlige omdannelse af NO_x, men den fotokatalytiske proces angriber problemet før NO_x'en har gjort skade. Med andre ord betyder dette, at omdannelse af NO_x til nitrat forekommer både med den fotokatalytiske proces men også som naturens egen proces.

5. Mobilitet og NO_x forurening i byrummet

Mere end 130 europæiske storbyer overskrider dagligt de fastsatte grænseværdierne for NO₂ (European Commission, 2017) men som nævnt i kapitel 3 medfører luftforurening store sundhedsmæssige konsekvenser – også når grænseværdierne overholdes. DCE estimerer at til trods for at Roskilde Kommune er under grænseværdierne for såvel årgennemsnittet som timegennemsnittet så medfører al luftforurening sundhedsmæssige omkostninger på omkring 500 mio. kr. om året.

NO_x niveauerne er særlig problematiske i dagtimerne. Dette skyldes blandt andet at forbrændingsmotorer, herunder vejtransport, i langt højere grad finder sted i dagtimerne. Dagtimerne er samtidig også det tidsrum, hvor størstedelen af befolkningen færdes uden for, så der er en korrelation mellem høje koncentrationer af luftforurening og antallet af personer, som opholder sig udendørs. Denne problemstilling uddybes nedenfor, hvor den udendørsfærd for følgende tre europæiske hovedstæder belyses; Stockholm, Berlin og København.

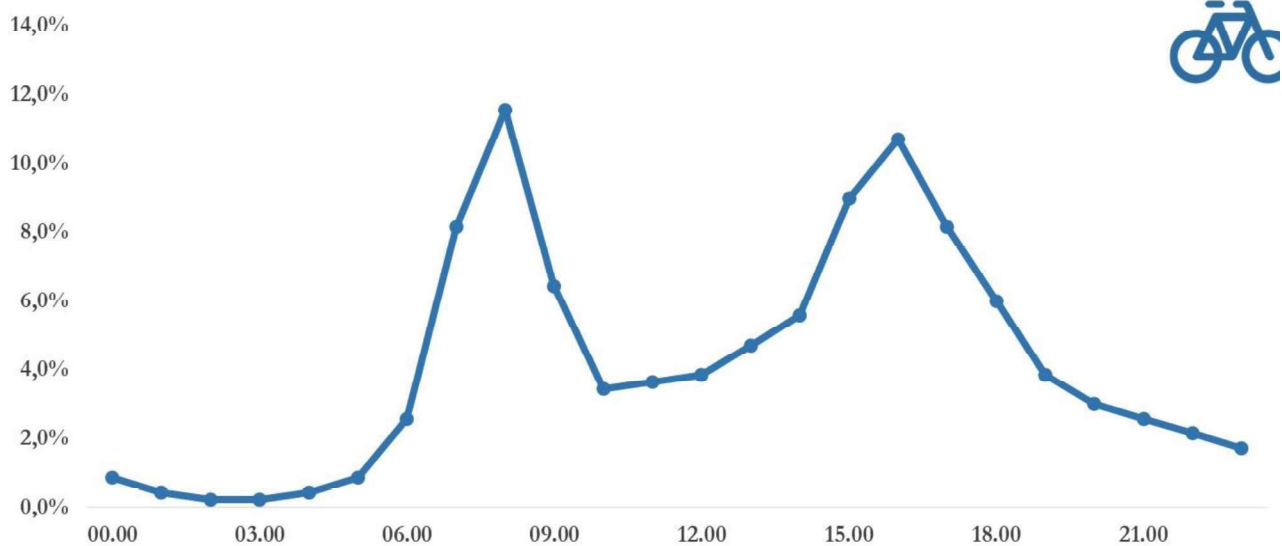
5.1. Mobilitet i storbyer

På baggrund af data fra Københavns Kommune belyses borgernes udendørs færden for henholdsvis cyklister og fodgængere. Den største aktivitet sker i morgentimerne og sen eftermiddagen for både fodgængere og cyklister. Der antages at dette er forbundet med rejseaktivitet til og fra arbejde, skole o.l.

5.1.1. Cykeltrafik

Cykeltrafikken i København øges væsentligt om morgenen i tidsrummet mellem kl. 06.00 og kl. 09.00, hvor ca. 22 % af cykeltrafikken i København finder sted (Københavns Kommune, Teknik- og Miljøforvaltningen, 2011). Det samme antal af cykler, 22 %, krydser de københavnske gader i tidsrummet mellem kl. 09.00 til kl. 14.00, mens der fra kl. 14.00 til kl. 18.00 eksisterer den højeste trafik af cykler i byrummet svarende til 40 % af den samlede cykeltrafik (Københavns Kommune, Teknik- og Miljøforvaltningen, 2011). Estimatet fra Københavns Kommune vurderes plausibelt, da morgentrafikken medfører en relativ høj cykelaktivitet blandt borgerne. En gennemsnitlig arbejdsdag, finder ca. sted fra kl. 09.00 til kl. 16.00, hvilket verificerer, at cykeltrafikken op til og efter dette tidsrum er på sit højeste (Københavns Kommune, Teknik- og Miljøforvaltningen, 2011). Samlet har Københavns Kommune vurderet, at 41 % af alt trafik til/fra arbejde mv. sker på cykel, hvormed der hvert døgn cykles 1,36 mio. km i København og samtidig krydser 265.700 cyklister indre by om dagen tur/retur (Astrup, 2016). Tidsrummet fra kl. 06.00 til kl. 18.00 repræsenterer hermed ca. 84 % af al cykeltrafik i København, hvilket betyder, at ca. 1,16 mio. km til daglig køres på cykel i dette tidsrum og at der i indre by alene cykles 223.000 tur/retur turer i samme tidsrum.

Figur 16: Københavns cykeltrafik i 2010, fordelt per time

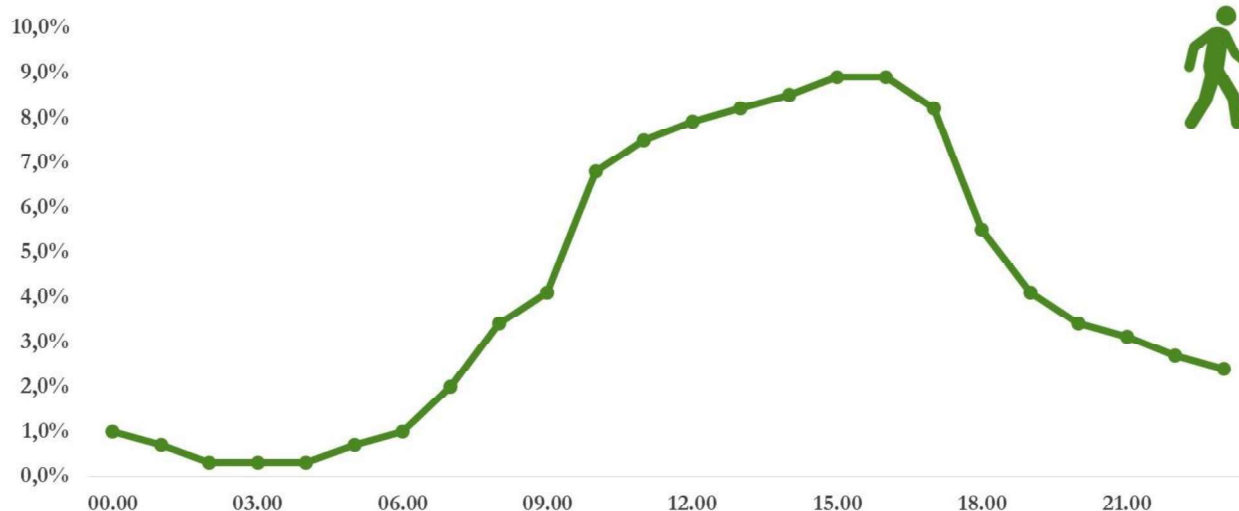


Kilde: Københavns Kommune, 2010

5.1.2. Fodgængertrafik

Fodgængertrafikken i København er stigende fra kl. 06.00, men dog i mindre grad end det er tilfældet med cykeltrafikken i samme tidsrum. Dog finder ca. 85 % af al fodgængertrafik sted i tidsrummet fra kl. 06.00 til kl. 18.00, hvilket er yderst sammenligneligt med cykeltrafikken. Der er en gradvis stigning fra kl. 06.00 til kl. 10-11.00, hvorefter niveauet stabiliseres frem til kl. 18.00 (Københavns Kommune, Teknik- og Miljøforvaltningen, 2010). Det antages, at ca. 25 % af alle transportturer i København sker ved gang (Københavns Kommune, Teknik- og Miljøforvaltningen, 2010). Hvis antal cykelturer i indre by er ca. 265.700 per dag (Astrup, 2016), og cykler repræsenterer 41 % af københavnernes transportvalg, er det plausibelt at antage, at der i indre by alene som minimum er 162.000 fodgængere per dag og at omkring 137.700 af disse finder sted i tidsrummet fra kl. 06.00 til kl. 18.00.

Figur 17: Københavns fodgængertrafik i 2010, fordelt per time



Kilde: Københavns Kommune, 2010

5.2. NO_x forurening i Stockholm

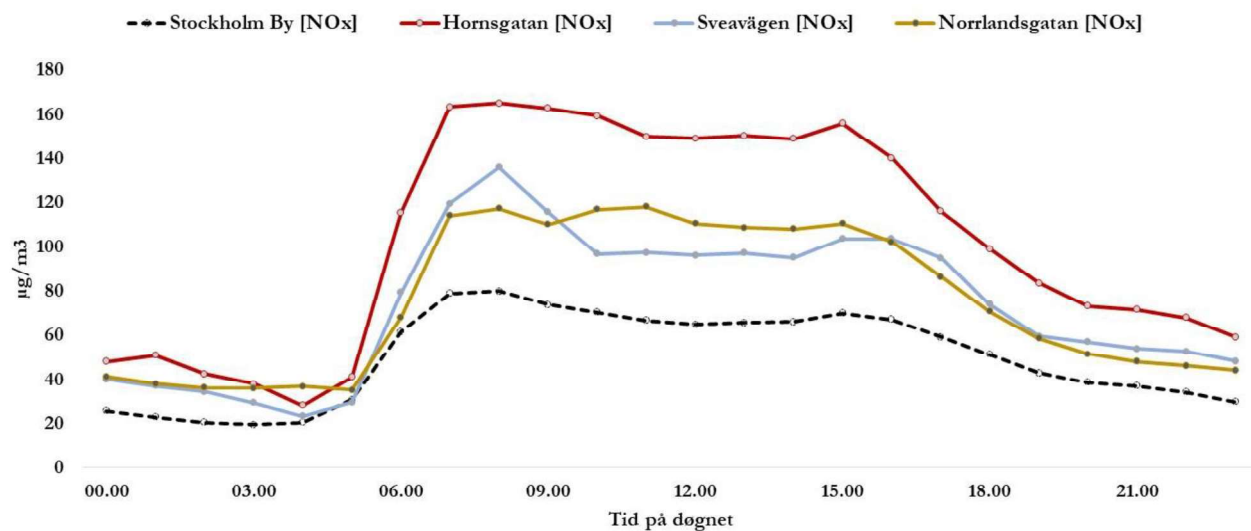
Stockholm har i flere år haft en luftkvalitet, som både på døgn- og timegennemsnit overskrider den fastsatte grænseværdi på 40 µg/m³ (SLB Analys, 2017). Dette er på trods af, at udviklingen for NO₂ koncentrationen i Stockholm har været svagt faldende i de senere år. Flere målestationer viser et årsgennemsnit, der befinder sig tæt på grænseværdien på 40 µg/m³, men som fortsat er væsentligt højere end byens egen målsætning på 20 µg/m³ (SLB Analys Miljöförvaltningen i Stockholm, 2017, s. 25). Miljöförvaltningen i Stockholm nævner en tredobling i antal dieslbiler, som én mulig forklaring på at NO₂ niveauerne ikke er faldet, som ventet.

Analyseres timemålingerne af henholdsvis NO₂ og NO_x værdierne for de i alt 11 målestationer i Stockholm, som både repræsenterer by- og baggrundsområder, fremvises en markant stigning af NO_x koncentrationen i tidsrummet fra kl. 06.00 til kl. 08.00. Denne koncentration holder sig relativt stabil frem til kl. 16.00 og først omkring kl. 17.00 begynder koncentrationen at falde. 10 ud af de 11 målestationer har NO₂ værdier, der er markant højere end 40 µg/m³ i dette tidsrum mens syv målestationer i gennemsnit oplever værdier, der er over 100 µg/m³ og en målestation oplever niveauer over 200 µg/m³. Det antages, at trafikmønsteret estimeret af Københavns Kommune for København er sammenligneligt med trafikken i Stockholm, hvormed omkring 80 % af befolkningen færdes i byrummet i det samme tidsrum, som luftforureningen er på sit højeste.

I 2016 er det gennemsnitlige niveau for NO₂ og NO_x koncentrationerne i Stockholm henholdsvis 28,8 µg/m³ og 65,7 µg/m³ mellem kl. 06.00 og kl. 18.00. I den resterende del af døgnet er gennemsnittet 23,8 µg/m³ og 49,8 µg/m³, hvormed der eksisterer en væsentlig variation, som afhænger af tidspunktet på døgnet. Luftkvaliteten i den periode hvor vi færdes udendørs er således 21 % højere for NO₂ og 32 % for NO_x end døgngennemsnittet. Til

sammenligning har de mest centrale målestationer et gennemsnitsniveau for 2016 på 37,7 µg/m³ for NO₂ og 84,2 µg/m³ for NO_x. Kigges der isoleret på tidsrummet mellem kl. 06.00 og kl. 18.00 er niveauerne henholdsvis 46,2 µg/m³ og 112,5 µg/m³. De høje koncentrationer betyder, at omkring 80 % af befolkningsgruppen, som til dagligt færdes i Stockholms indre by eksponeres mod en luftkvalitet, der medfører store negative sundhedskonsekvenser og som i gennemsnit befinder sig ca. 20 % over grænseværdierne.

Figur 18: NO_x koncentration i 2016 for Stockholm, fordelt per time

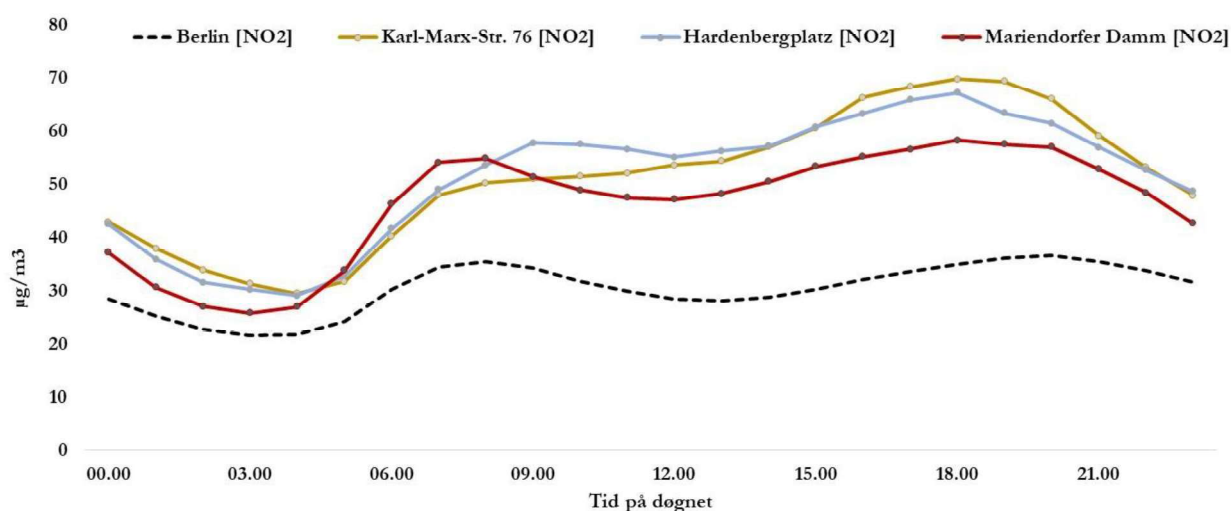


Kilde: SLB Analys, 2017

5.2.1. NO_x forurening i Berlin

Berlin har i alt 16 målestationer, der, ligesom i Stockholm, er placeret forskellige steder i byen for at måle luftkvaliteten i både tungt- og mindre trafikerede områder uden for den indre bykerne (Umweltbundesamt, 2017). Seks¹ målestationer havde i 2016 et årsgennemsnit på mellem 40 og 52 µg/m³. Tilsvarende havde de i tidsrummet fra kl. 06.00 til kl. 18.00 et gennemsnit på mellem 45 og 57 µg/m³, hvilket er mellem 12,5 % og 42,5 % over den årlige grænseværdi på 40 µg/m³. Overordnet viste Berlins målestationer mere end 37.000 tilfælde, hvor NO₂ koncentrationen var højere end 40 µg/m³, hvormed koncentrationerne for NO₂ i 27 % af tilfældene befinder sig på et niveau, som er højere end den årlige grænseværdi. Gældende for målestationerne, som er placeret i Berlins mest forurenede områder, er, at de i omkring 60 % af tilfældene måler en NO₂ koncentration, der ligger over den årlige grænseværdi på 40 µg/m³.

Figur 19: NO_x koncentration i 2016 i Berlin, fordelt per time



Kilde: Umweltbundesamt, 2017

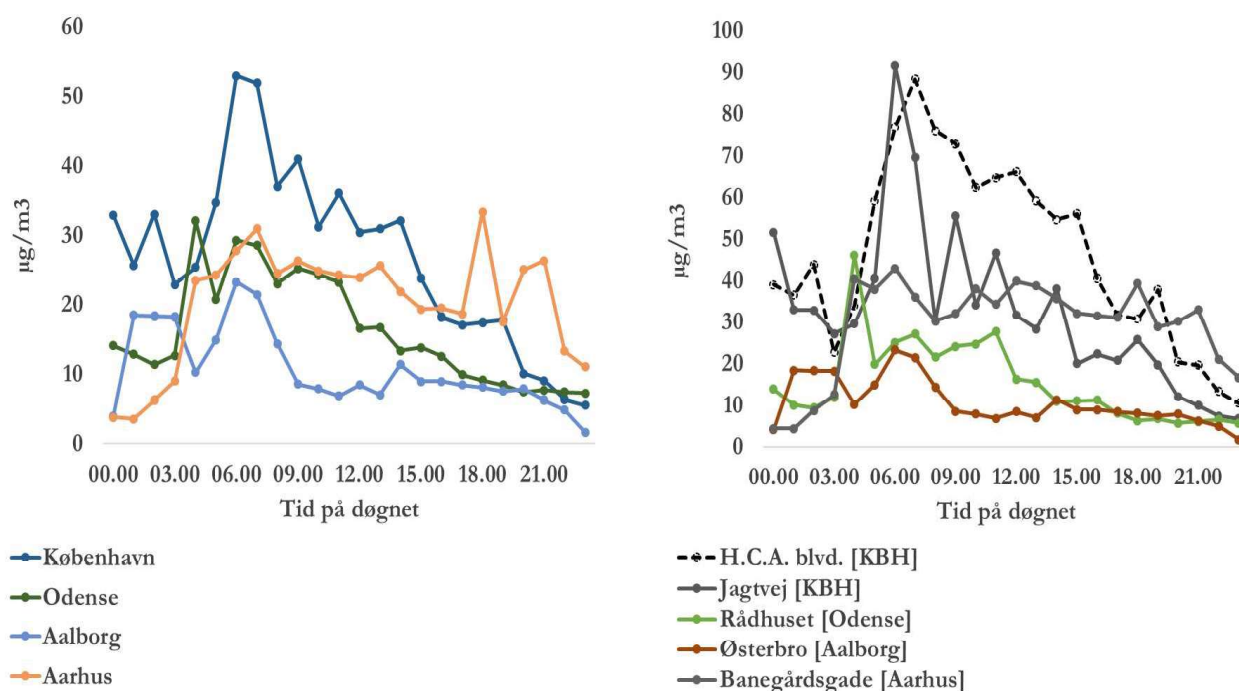
¹ Karl-Marx-Str. 76, Steglitz-Schildhornstr., Hardenbergplatz, Friedrichshain-Frankfurter Allee, Silbersteinstr., Mariendorfer Damm

5.2.2. NO_x i København, Aarhus, Aalborg og Odense

Luftkvaliteten i København har særligt i de senere år været et omstridt emne. Dette skyldes blandt andet, at der forekommer meget høje værdier af NO₂ og NO_x i byrummet ligesom den omdiskuterede flytning af målestationen på H.C. Andersens Boulevard også har bidraget hertil (Miljøministeriet, Miljøstyrelsen, 2015, s. 22). Det har ikke været mulig, at fremskaffe måledata fra de danske målestationer for et helt år da de ikke gøres offentligt tilgængelige på årsbasis som i Stockholm og Berlin. Der anvendes i stedet timedata fra målestationer i de største danske byer fra 28. juni 2017, hvorunder data fra Københavns tre målestationer indgår.

Mønsteret som er observeret i de Stockholmske målestationer er mere markant end det, som tallene fra 28. juni 2017 viser fra for eksempel H.C. Andersens Boulevard. Der forekommer dog en markant stigning i koncentrationen af NO₂ omkring kl. 06.00, hvilket bevirker, at niveauet er ca. 100 % over den årlige grænseværdi. Sidstnævnte er yderst sammenligneligt med de observerede mønstre for både Stockholm og Berlin. I tidsrummet mellem kl. 06.00 og kl. 18.00 eksisterer der en gennemsnitlig NO₂ koncentration på omkring 60 µg/m³, mens døgngennemsnittet indeholder en koncentration på 46,5 µg/m³. Kigger man på målestationen på Jagtvej i København, viser den samme tendens. Målestationerne i Odense og Aarhus viser en lavere koncentration, men også her fremkommer der en markant stigning i koncentrationsniveauet omkring kl. 06.00.

Figur 20: NO_x koncentration den 18. juni 2017 i Danske byer, fordelt per time

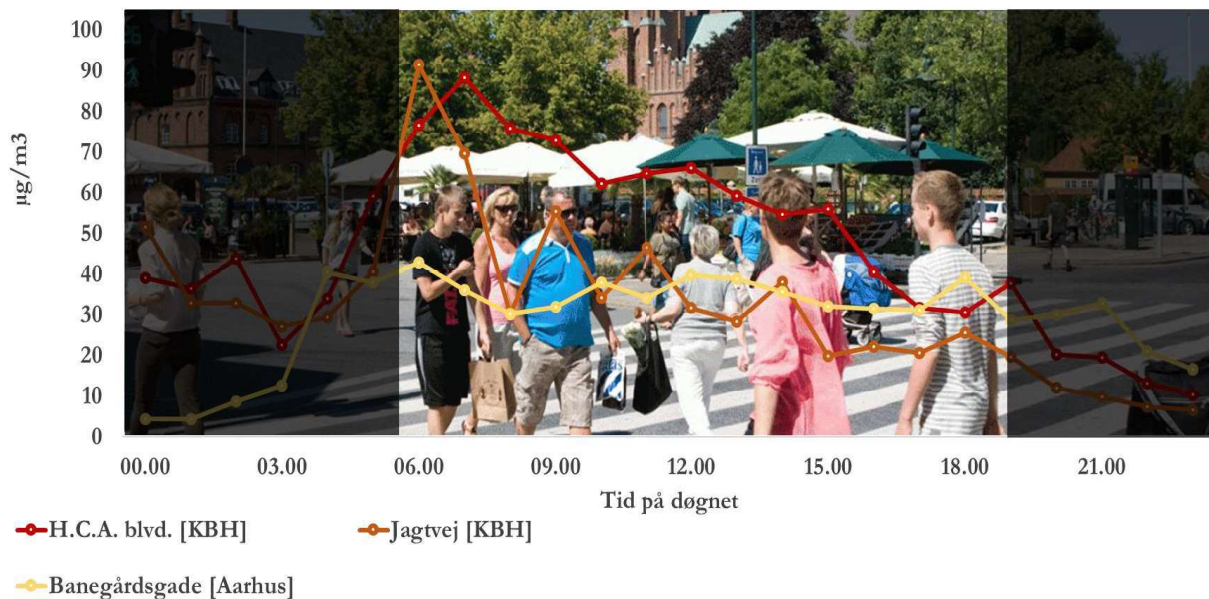


Kilde: Danish Center for Environment & Energy, 2017

5.3. Fotokatalyse som et instrument i det nære byrum

En af løsninger til at imødekomme ovenstående problemstilling er den fotokatalytiske teknologi. Teknologien udnytter sollyset til at reducere 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 luftforurening, virker teknologien bedst. Det er dog en vigtig pointe at fotokatalyse kun er én del af løsningen i forhold til at reducere NO_x forureningen i byrummet. I det følgende kapitel vil resultaterne omkring anvendelse af fotokatalyse i det nære byrum i Roskilde blive behandlet.

Figur 21: Fotokatalyse er aktivt i de timer hvor NO_x koncentrationen er højest og hvor folk færdes



Kilde: Danish Center for Environment & Energy, 2017

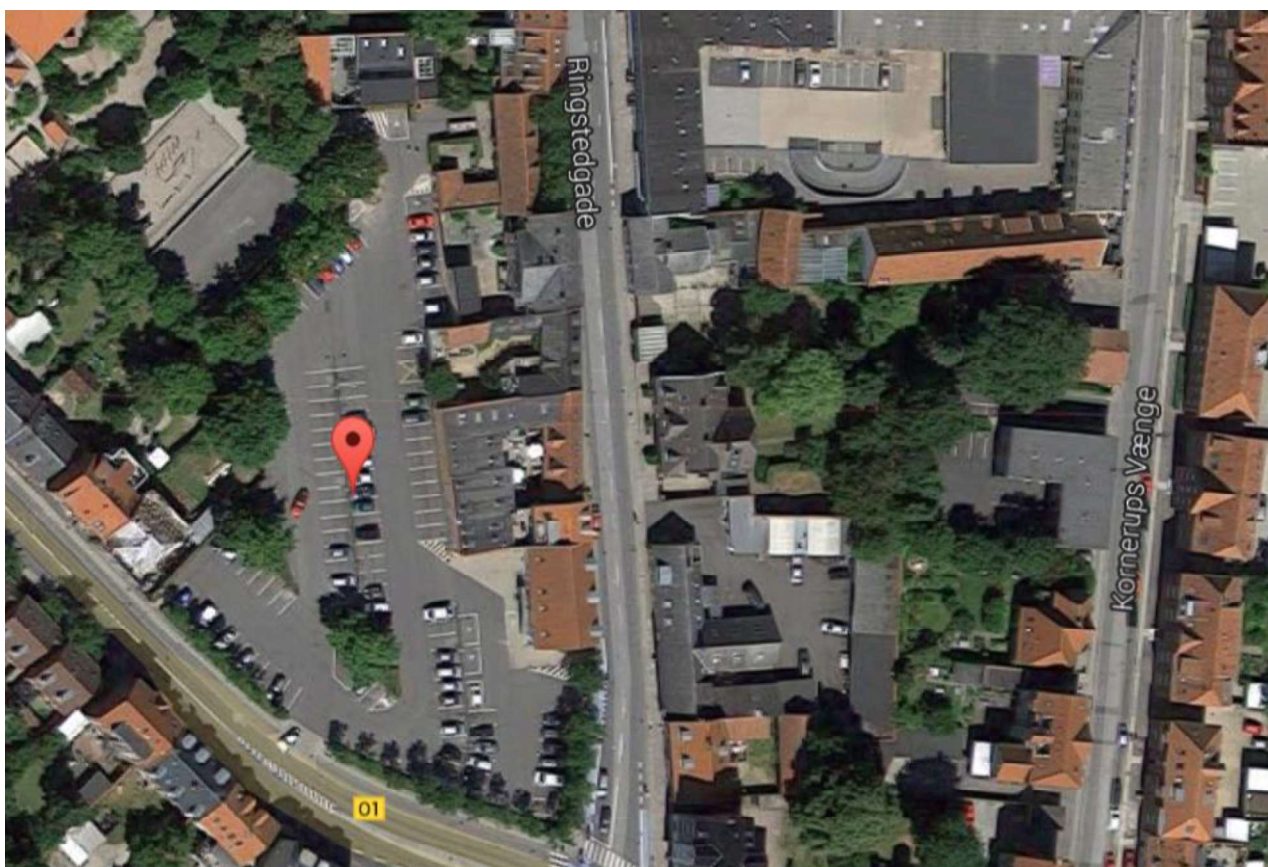
6. Resultater

Der er i dette projekt indgået en aftale mellem Roskilde kommune og Photocat A/S om behandling af parkeringspladserne beliggende på henholdsvis Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde og Bønnelyckes Plads i Roskilde. Parkeringspladserne skal gøres aktive og dermed luftrensende vha. Photocat's NO_xOFF teknologi. Det samlede areal på de to pladser er ca. 5.000 m² fordelt med ca. 1.200 m² på Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde og ca. 3.800 m² på Bønnelyckes Plads. Begge parkeringspladser har en overfladebelægning af asfalt, som ikke er nylagt. Projektet vil derfor være en levetidsforlængelse af de eksisterende overflader på Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde og Bønnelyckes Plads og derved en efterbehandling af den eksisterende belægning med NO_xOFF teknologien.

6.1. Lokationer

Parkeringspladsen på Bønnelyckes Plads er placeret centralt i Roskilde nær centrum og tæt på trafikerede veje. Parkeringspladsen er ligeledes vel besøgt og der er en relativ stor udskiftning af biler, der holder på pladsen, hvilket kan indikere et potentielt højt indhold af NO_x i luften. De 3.800 m² parkeringsareal gør parkeringspladsen til en mellemstor parkeringsplads i Roskilde by.

Figur 22: Luftfoto af Bønnelyckes Plads på ca. 3.800 m²



Kilde: Google Maps, 2017

På nedenstående billede er et oversigt billede af pladsen vist, hvor NO_xOFF behandlingen skal appliceres.

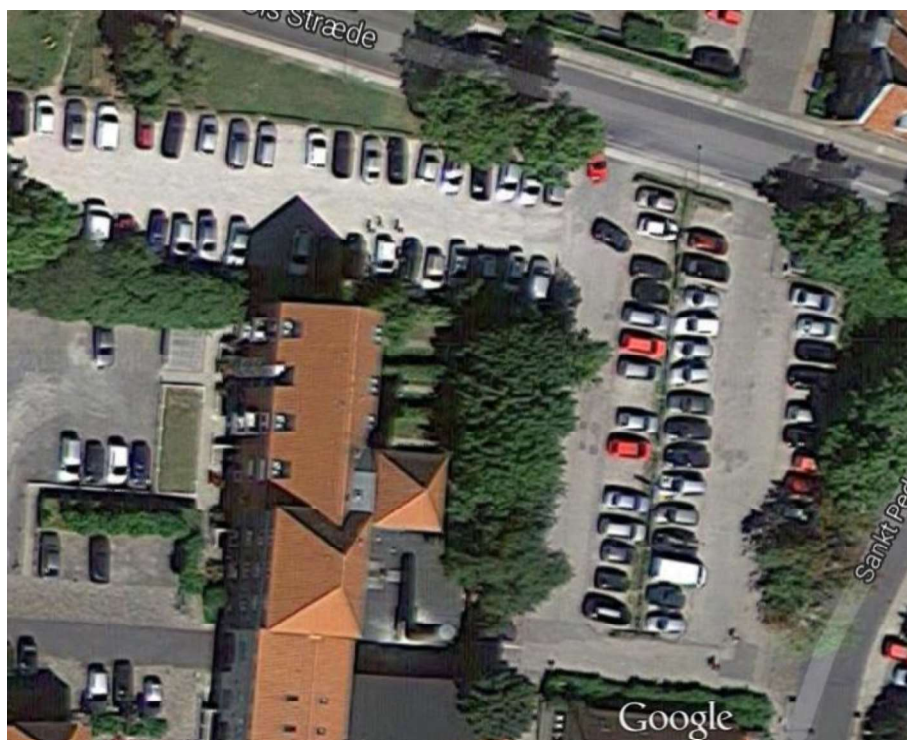
Figur 23: Oversigts billede af Bønnelyckes Plads



Kilde: Photocat A/S

Parkeringspladsen ved Skt. Peder/Skt. Ols stræde er placeret centralt nær Roskilde centrum. Parkeringspladsen er høj trafikeret med korte parkeringsintervaller og høj trafik af ind- og udkørende biler og der er derved et potentielt højt indhold af NO_x i luften. De 1.200 m² gør parkeringspladsen til en mindre parkeringsplads i Roskilde by.

Figur 24: Luftfoto af Skt. Peder / Skt. Ols Stræde på ca. 1.200 m²



Kilde: Google Maps, 2017

6.2. For-projekt undersøgelse

Belægningen på de to parkeringspladser på henholdsvis Bønnelyckes plads samt Skt. Peder/Skt. Ols stræde består af flere år gammel asfalt. Asfalt forstås i denne sammenhæng som en blanding af stenmaterialer bundet sammen af tjære, også kendt som bitumen. Asfalten påføres flydende, hvorefter den hærdner op og giver en fast og slidstærk overflade. Princippet er, at stenkomponenten skal være den slidstærke del af asfalten, da tjære i sig selv forholdsvis hurtig bliver slidt væk. Nylagt asfalt er en blanding, hvor stenmaterialet er opblandet i tjære. Nylagt asfalt vil derfor i overfladen indeholde en stor del tjære og samtidig vil stenmaterialet være dækket af tjære. Fotokatalytiske materialer vil derfor ikke kunne appliceres direkte på nylagt asfalt, da fotokatalyse vil nedbryde den organiske tjære ligesom fotokatalysatoren vil falde af med regnvandet.

Efter ca. 6 måneder, afhængig af slid og trafik på asfalten, er det øverste lag af tjære slidt af, hvormed det uorganiske stenmateriale er tilstede i overfladen. Det er hermed muligt at applicere Photocat's NO_xOFF teknologi bestående af fotokatalytisk materiale på en ca. 6 måneder gammel asfaltbelægning.

Det er dog ikke tilstrækkeligt blot at applicere en vandig opløsning med fotokatalysatoren TiO₂, da der også skal tages højde for, hvordan den hæfter til det mineralske stenmateriale. Photocat har stor erfaring med netop den disciplin at hæfte til forskellige overflader, bl.a. mineralske granulater på tagpap og betonfliser. Første undersøgelse i dette projekt er derfor at tilpasse Photocat's NO_xOFF teknologi til asfalten på de to parkeringspladser i Roskilde.

6.2.1. Laboratorieforsøg

Laboratorieforsøgene har til formål at tilpasse og optimere en fotokatalytisk væske, som kan appliceres på parkeringspladserne i Roskilde by, og som har den ønskede aktivitet. Aktiviteten vil blive målt efter standarden ISO 22197-1, som er tilgængelig i Photocat's laboratorie og vedhæftningen vil blive testet efter EN 1297-2004, som er en accelereret holdbarhedstest, hvor man tester et givent produkts modstand overfor vand og lys. Denne holdbarhedstest kan relateres til, hvordan et produkt vil klare sig i de naturlige omgivelser. Testen vil blive brugt i denne rapport ved, at den fotokatalytiske aktivitet bliver målt før og efter en holdbarhedstest, hvorefter den relative forskel i aktivitet anvendes til at bedømme holdbarheden af den udviklede løsning.

For at kunne måle på den fotokatalytiske aktivitet, samt teste holdbarheden, er det nødvendigt at bruge samme materiale, som ligger på de to parkeringspladser. Fra et renoveringsprojekt i Roskilde kommune blev der derfor indsamlet prøver af asfalten i Roskilde og det er disse prøver, som anvendes til optimering af den fotokatalytiske væske mht. holdbarhed og aktivitet.

Af figur 24 på næste side er disse prøver illustreret hvor der kan ses at overfladen af de indsamlede asfaltprøver indeholder en stor mængde mineralsk stenmateriale, som er fordelagtigt at hæfte fotokatalysatoren til. Det sorte på prøverne er tjærematerialet.

I det følgende beskrives analyse- og testmetoden til at optimere og dokumentere en fotokatalytisk asfaltvæske – Photocat NO_xOFF Asfalt.

Figur 25: Asfaltprøver indsamlet fra et renoveringsprojekt i Roskilde Kommune



Kilde: Photocat A/S

6.2.2. Fotokatalytisk aktivitetstest – ISO 22197-1 (Fjernelse af NO_x)

Indenfor fotokatalyse findes der et antal ISO standarder, der anvendes til at fastlægge aktiviteten af specifikke prøver. ISO standarden er bredt anerkendt, som værende den førende fotokatalytiske testprocedure, der anvendes til at kvantificere og rangere kommercielle produkter rundt om i verden. ISO testen, der anvendes i dette projekt, er den såkaldte ISO 22197-1, som omhandler fjernelse af NO_x ved UV-belysning af fotokatalytiske bygningsmaterialer. Photocat har en ISO 22197-1 opstilling i laboratoriet i Roskilde og udfører over 2.000 ISO målinger om året, både til intern udvikling samt til validering og dokumentation af Photocat's kunders produkter.

6.2.2.1. Testmetode

ISO standarden er bygget op omkring en kontinuerlig flowcelle med et laminært flow af NO_x gas henover den testede prøve. Proven indsættes i cellen og måler 49x99 mm² og luftflowet henover prøven er 3 l/min med en initial NO koncentration på 1,0 ppm. Lysintensiteten over prøven er defineret til 1,0 mW/cm² UVA lys og den relative luftfugtighed skal være 50 %. Testcellen er konstrueret med et laminært luftflow og der er en åbning på 5 mm over prøven og op til låget på cellen. Låget er udført i UV-transparent glas. Test cellen er produceret af Prof. Bahnemann fra Leibniz Universität Hannover. Prof. Bahnemann står bl.a. fader til ISO standarderne, som han var medvirkende til at få oversat fra de oprindelige japanske JIS standarder. Forsøgsopstillingen i Photocat's laboratorie er valideret ved en Round-Robin test mellem Photocat's laboratorie, laboratoriet på Leibniz Universität Hannover og Laboratoire Centre de recherche routières i Sterrebeek, Belgien.

6.2.2.2. Testmateriale of prøveforberedelse

De indsamlede asfaltstykker, se figur 24, blev skåret i dimensioner af 49x99 mm². Proverne blev rengjort med vand og børste. Proverne blev tørret før applicering af de forskellige Photocat væsker, hvorefter prøverne blev efterladt til tørring inden NO_x analysen blev udført.

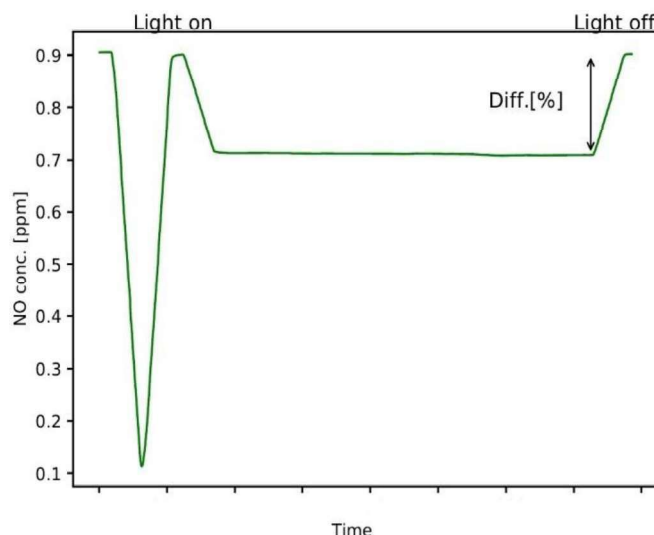
6.2.2.3. Testbetingelser

Testcelle:	Fotoreaktor med et UV-transparent låg og et 5,0 mm luftflow henover testprøven.
Temperatur:	20 °C ± 5 °C
Relativ fugtighed:	50 ± 15 % RH
Kunstig lyskilde:	1,0 mW/cm ² UVA (UVA-340 lysstofrør)
Initial koncentration af NO:	1,0 ppm NO
NO _x analyseapparat:	Horiba APNA NO _x analyser model 370 med en detektionsgrænse på 1 ppb.

6.2.2.4. Evaluerings af resultaterne

Aktiviteten i de testede prøver udtrykkes som den procentvise forskel mellem NO niveauet ved endt forsøg, hvor UV lyset er slukket og NO niveauet under UV lys efter, at NO niveauet er stabilt. Dette er skematisk vist i figur 25.

Figur 26: Skematisk graf for en standard NO_x analyse



Kilde: Photocat A/S

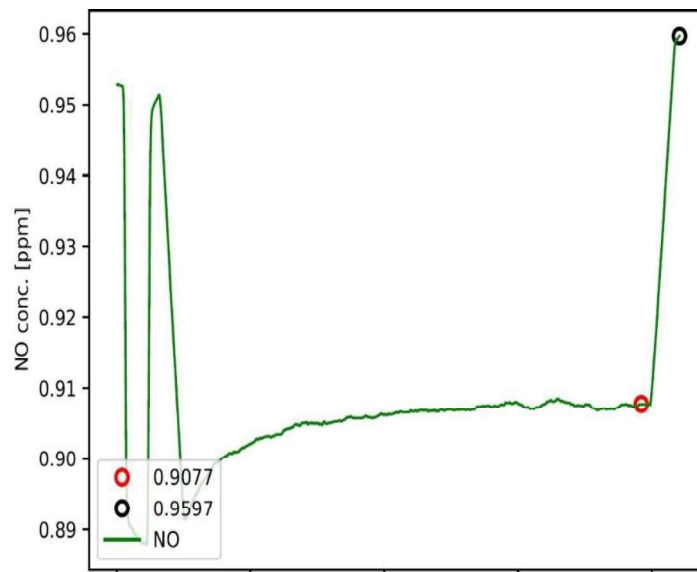
6.2.2.5. Fotokatalytisk asfalt for Roskilde Kommune

Tre forskellige formulering af en fotokatalytisk væske blev testet på de indsamlede asfaltprøver. De tre forskellige formuleringer blev benævnt:

- 1) Asfalt 1
- 2) Asfalt 2
- 3) Asfalt 3

De tre formuleringer blev testet for NO_x aktivitet ifølge ISO 22197-1, hvorefter de blev indsat i en accelereret ældningstestopstilling (QUV/Spray fra Q-Lab) og udsat for 138 timers ældningstest, svarende til ca. 6 måneders reel holdbarhed. Ældningstesten udføres efter EN 1297:2004. På nedenstående figur er NO_x analysen for Asfalt 1 efter 0 timers ældning vist.

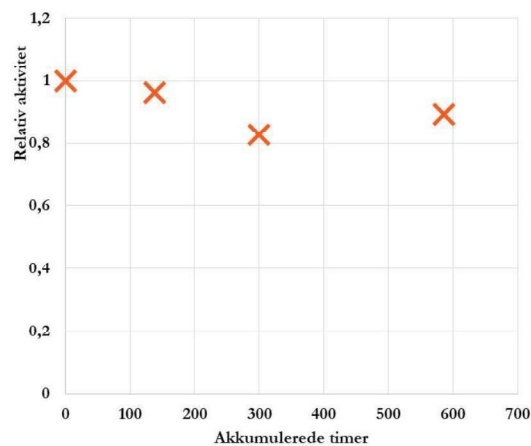
Figur 27: NO_x graf for Asfalt 1 efter ISO 22197-1



Kilde: Photocat A/S

Alle 3 formuleringer blev testet efter ISO 22197-1 før og efter 138 timers ældning. På baggrund af data blev Asfalt 1 udvalgt som den bedste kandidat til behandling af parkeringspladserne i Roskilde. Derfor blev det valgt at udføre længere ældningstest på denne formulering. I figur 27 er den relative aktivitet vist som funktion af ældningstiden efter EN 1297:2004 for 0, 138, 300 og 586 timer. Den relative aktivitet er beregnet ud fra startaktiviteten efter 0 timer. Normal antages det, at 300 timer i ældningstest efter EN 1297:2004 er tilsvarende 1 års reel test.

Figur 28: Ældringstest af Asfalt 1 efter EN 1297:2004

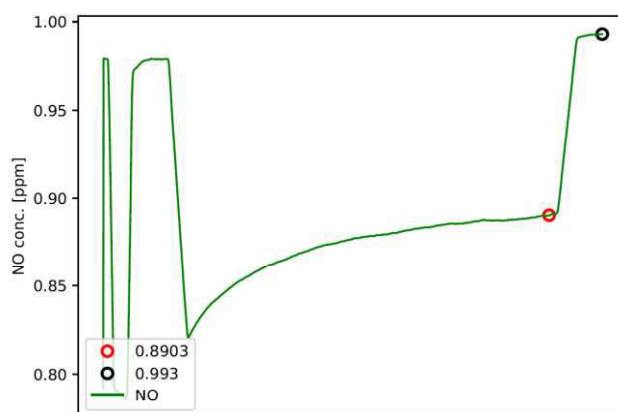


Kilde: Photocat A/S

Af figur 28 fremgår det, at formuleringen Asfalt 1 holder en meget flot aktivitet som funktion af ældningstiden. Efter ca. 600 timer eller 2 år i reel tid er NO_x aktiviteten stadig høj og et fald på op til 17 % kan observeres. Disse data er i overensstemmelse med andre produkter udviklet af Photocat, hvor der ses et initielt fald det første år hvorefter aktiviteten stabiliseres. Det konkluderes, at Asfalt 1 kan anvendes på de to parkeringspladser i Roskilde Kommune.

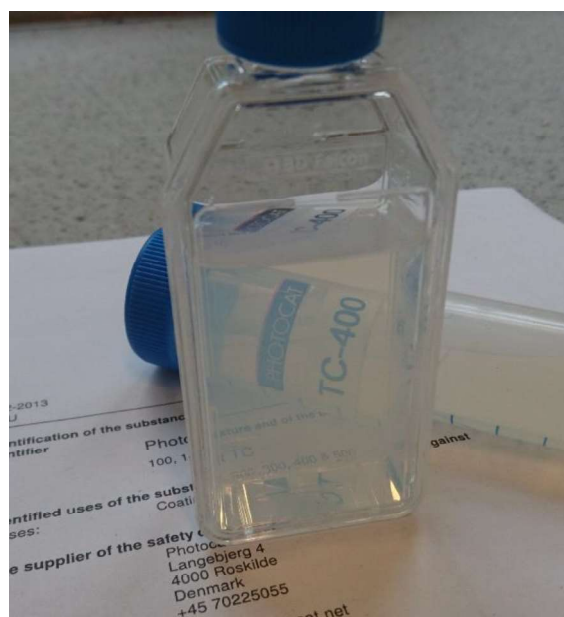
Den absolutte aktivitet af Asfalt 1 blev efterfølgende optimeret. For at kunne opnå den ønskelige aktivitet og dermed den ønskelige mængde fjernet NO_x justeres mængden af katalysator i formulering, som hermed fastlåses og benævnes i det følgende som det kommercielle produkt Photocat TC 400 Asfalt. I nedenstående figur er NO_x reduktionen for Photocat TC 400 Asfalt vist efter ISO 22197-1.

Figur 29: NO_x test af Photocat TC 400 efter ISO 22197-1



Kilde: Photocat A/S

Photocat TC 400 Asfalt er en transparent gullig katalysatorvæske, som ved applicering på asfalt vil have en høj aktivitet samtidig med, at den hæfter til de mineralske sten i asfaltoverfladen og danner en holdbar løsning. I den følgende illustration er Photocat TC 400 Asfalt vist, hvor der efterfølgende blev produceret 1.000 kg Photocat TC 400 Asfalt til appliceringen på de to parkeringspladser.



6.3. In-situ målings set-up

For løbende at kunne måle aktiviteten på de to parkeringspladser i Roskilde Kommune blev der udviklet en standard in-situ måling. Baseret på erfaringerne fra tidligere udførte in-situ tests rapporteret i litteraturen, se afsnit 4.1, samt Photocat's egen in-situ test i Københavns lufthavn, se afsnit 1.1, vurderes det muligt at sammenfatte erfaringerne og på denne baggrund udvikle en bedre og ikke mindst mindre tidskrævende test.

Hovedpunkterne bag in-situ testen, som udvikles til Roskilde Kommune projektet, er at aktiviteten af de fotokatalytiske behandlede overflader skal kunne måles på stedet. Derudover skal dette kunne gennemføres løbende, på forskellige tidspunkter af året samtidig med at dette skal kunne gennemføres af én mand på én dag. Målingerne skal desuden kunne sammenlignes og anvendes til at vurdere holdbarheden af den applicerede løsning, som herefter bruges til at estimere den mængde af NO_x, der bliver fjernet over tid ved hjælp af denne innovative løsning.

6.3.1. Udvikling af mobilt in-situ set-up

Princippet bag Photocat's in-situ måling er at tage ISO 22197-1 testen, se afsnit 6.2.2, og kopiere denne, så den kan foregå på stedet på parkeringspladserne. Hvormed der skal udvikles en transportabel ISO test, som kan installeres i en varebil og anvendes til løbende test på parkeringspladserne.

For at effektivisere dette indkøbes en Eco Physics CLD 60 NO_x måler fra CK Environment. Eco Physics NO_x måleren måler efter Chemiluminescence princippet og monteres i et vertikalt rack, som illustreret i figur 30.

Racket bygges ind i et mobilt system, som kan transporteres rundt i en varebil og som inkluderer pumper, gasflasker og flowmålere. Med dette system kan der monitoreres og styres real-life målingerne på en kontrolleret måde.

6.3.1.1. Testmetode

Testmetoden bygger på at overføre forsøgsbetingelserne fra laboratorie ISO 22197-1 testen og anvende den på stedet, dvs. måle den aktuelle aktivitet på parkeringspladserne i Roskilde. Den mobile testmetode til at måle faktuelle nedbrydningsaktiviteter er vist på billedet til venstre.

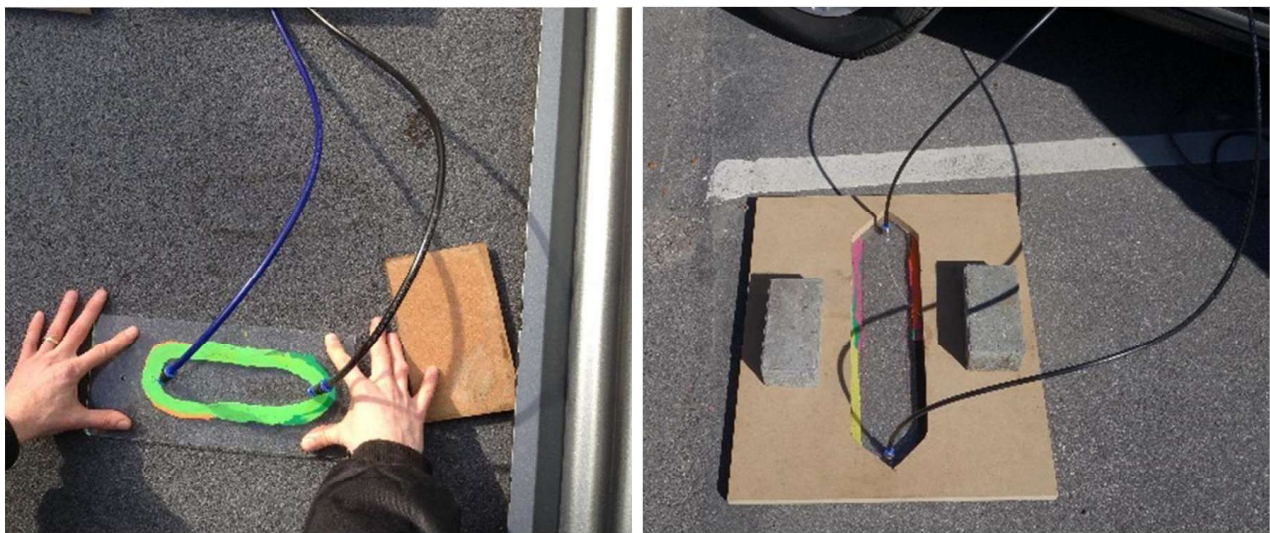
Figur 30: Mobilt NO_x måler set-up og Eco Physics CLD 60 anvendes til in-situ målinger



Kilde: Photocat A/S

In-situ måle setuppet består af en 1) en måleenhed (Eco Physics), 2) en dataopsamlingsenhed, 3) en blande- og kontroldel og 4) en testcelle. Måleenheden er, som nævnt ovenfor, en Ecophysics NO_x måler, der måler efter Chemiluminescence princippet. Data bliver opsamlet, monitoreret og vist på en bærbar pc, mens forsøgene foregår. Blande- og kontroldelen består af to membranpumper, som opsamler luften fra omgivelserne og en flowmåler til at kontrollere og regulere at det korrekte flow af den omgivende luft passerer testcellen. Derudover er der i blande og kontroldelen inkluderet modelgasser, som er indbygget i testenheden, hvilke kan anvendes i stedet for den omgivende luft til kalibrering og kontrollerede målinger. Testcellen er opbygget efter ISO princippet, men den store forskel er, at bunden er udeladt, hvormed den kan monteres på parkeringspladserne og bruge de aktuelle behandlede områder som testprøver. Der arbejdes med to forskellige testceller, en stor på 532 cm² og en mindre på 100 cm², hvilket illustreres i nedenstående billeder.

Figur 31: Testceller på 100 cm² og 532 cm²



Den store udfordring med testcellerne er at få dem monteret på testoverfladen, i dette projekt på asfalt, samtidig med at cellen er tæt og kan afmonteres overfladen igen uden at påføre skader på cellen og overfladen. Denne udfordring blev løst ved at anvende modellervoks som forseglingspakning. Modellervoksen udskiftes efter 1-3 målinger, alt efter beskaffenheden af forseglingen. Selve test setuppet installeres i en varebil, hvorved man forholdsvis let kan transportere det rundt til de to parkeringspladser.

Figur 32: In-situ målinger med NO_x set-up'et integreret i varebil



6.3.1.2. Set-up parametre

Test setuppet er konstrueret med en testcelle, se figur 31; med et transparent polykarbonat UV-låg, hvormed UV-lys fra solen kan ramme asfalterfladen uden absorption af testcellen. Lufthøjden mellem asfalten og polykarbonat låget er 5-8 mm, hvorved et laminært luftflow opnås henover asfalterfladen gennem en måling. Forsøgsparametrene er:

Temperatur:	Ambient
Relativ fugtighed:	Ambient
Lyskilde:	Ambient sol, hvor lysintensiteten måles med en PMA2100 måler med en UVA detektor og kunstig lys med 3,0 mW/cm ² UVA
Start koncentration af NO:	Ambient og model gas (100-500 ppb)

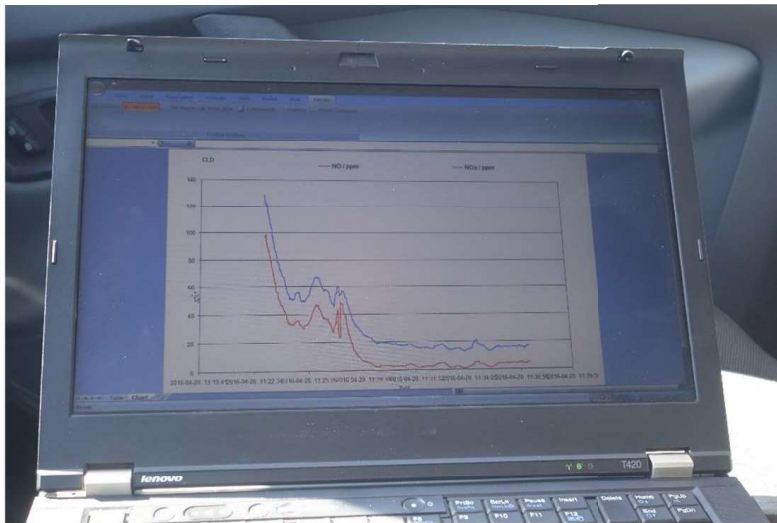
NO_x analysatoren er en EcoPhysics NO_x analyser model CLD 60 med en detektionsgrænse på 1 ppb.

6.3.1.3. Valideringsmålinger

Til at validere og bekræfte, at den udviklede målemetode er anvendelig i projekter, blev der udført et pilotforsøg på en parkeringsplads i det østlige Roskilde, den gamle Takedas parkeringsplads. To parkeringsbåse blev behandlet med Photocat TC 400 Asfalt behandlingen og efter én uge, blev testmåleenheden kørt til pladsen for testmålinger.

Forsøgscellen blev monteret måle setuppet med slanger og opsamlingsenheden blev startet for at indsamle NO_x data. Det første vigtige punkt var at få testet, om testcellen kunne monteres på asfalten, om den kunne holdes tæt og endelig at teste, om det var muligt at monitere målingerne mens de pågår. På nedenstående billeder er den første succesfulde måling, med dataopsamling samt test med målecellen illustreret.

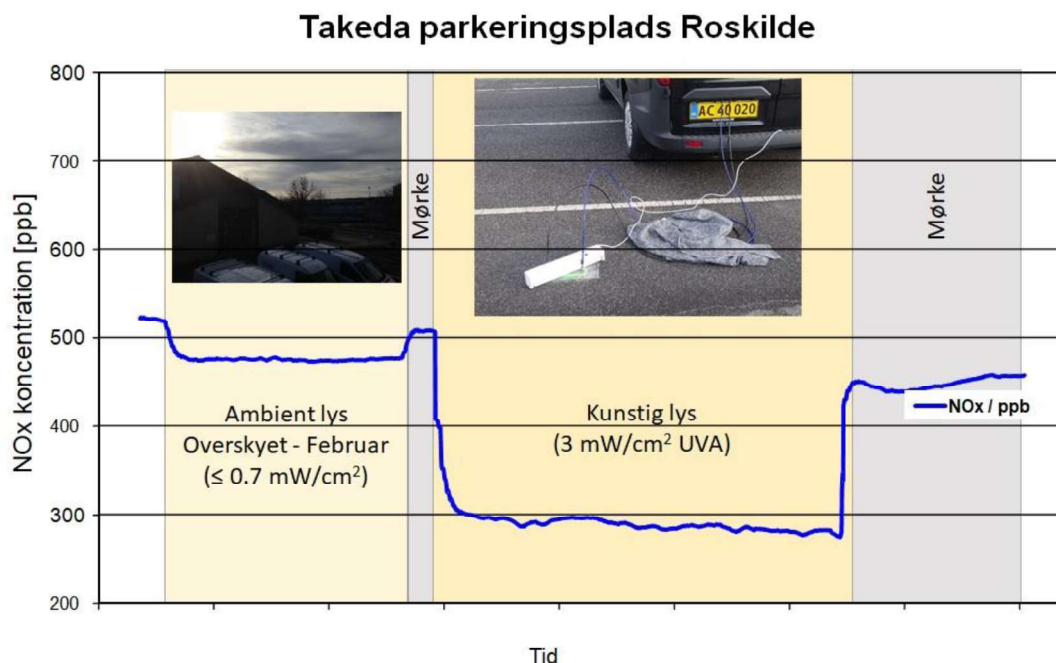
Figur 33: Realtids opsamling af NO_x data



Efter at forsøgsopstillingen var valideret og en succesfuld test var udført, blev der kørt en reel testkørsel for at se, hvor aktiv testproven på Takeda's parkeringsplads var. På den nedenstående figur er denne test visualiseret.

Data på figur 34 viser, hvorledes forsøgene i dette projekt ønskes udført. Et forsøg er delt op i to aktive forsøgsperioder, hvor der er lys på den aktive overflade. De er markeret med gult i figuren. Et forsøg starter op med at gennemstrømme NO gas henover testcellen fra en modelgas medbragt i forsøgs setuppet. I ovenstående test blev der sigtet efter en koncentration af NO gas på ca. 500 ppb. Først køres en periode i mørke, markeret som den første hvide periode, her sikres det, at koncentrationen, der gennemstrømmer cellen, er konstant. Når koncentrationen er konstant, fjernes klædet, som mørklægger cellen og det omgivende sollys, herefter betegnet ambient lys, bruges til at aktivere og køre NO_xOFF processen på parkeringspladsen, og i dette tilfælde i testcellen. Intensiteten af det ambient lys måles med en PMA 2100 måler med UVA detektor, se nedenstående billede.

Figur 34: Første test på testområdet på Takedas parkeringsplads



Kilde: Photocat A/S

I denne måling, som blev gennemført på en overskyet dag i februar, blev der målt en UVA intensitet på $< 0,7 \text{ mW/cm}^2 \text{ UVA}$ ved anvendelse af ambient lys. Som det ses i grafen på figur 34, så begynder parkeringspladsen at nedbryde NO, så snart lys rammer overfladen. Efter en stabil lang periode med data, hvor NO koncentrationen er stabil, dækkes forsøgscellen igen med et klæde, hvilket bevirker, at NO koncentrationen stiger, da der ingen lys er til at drive processen. Når NO koncentrationen igen er stabil i mørke, belyses testcellen med en kunstig lyskilde på $3,0 \text{ mW/cm}^2 \text{ UVA}$ lys. Hvor første del af testserien anvender det lidt ustabile ambient lys, er der i anden del en helt kontrolleret lyskilde, der under hele forsøget, afgiver $3,0 \text{ mW/cm}^2 \text{ UVA}$ lys på overfladen. Som forventet,

Figur 35: Eksempel på måling af lysintensitet



forekommer en forøget nedbrydelse af NO ved en højere lysintensitet. Efter en stabil periode med NO koncentration, hvor ligevægt er indtruffet, afsluttes forsøget ved at slukke for det kunstige lys og dække forsøgscellen med et klæde.

Ovenstående testprocedure anvendes til måling og evaluering af aktiviteten på de behandlede parkeringspladser i Roskilde.

6.4. Behandling af Parkeringspladserne

Parkeringspladserne blev behandlet den 29. september 2014. Behandlingen af parkeringspladserne blev opdelt grundet Roskilde kommunes krav om, at parkeringspladsen ikke måtte lukkes helt under behandlingen. Derfor blev dele af parkeringspladserne afspærret, mens andre dele forblev åbne. Den afskærmede del, som var tømt for biler, blev herefter fejjet med en manuel fejmaskine. Efterfølgende blev det fejede areal appliceret med en elektrisk Berthoud 18 liter rygsprøjte med motor og en 65 cm sprøjtebom med 4 dysser, hvorefter arealet tørrede og en ny del af parkeringspladsen kunne appliceres.

Figur 36: Manuel fejning af parkeringspladsen og applicering af den fotokatalytiske væske



Tørringen af parkeringspladsen skete ved naturlig fordampning af vandet. Efter ca. 30 minutter, var overfladen berøringsstør og efter ca. 120 minutter, blev parkeringspladsen åbnet for gennemkørsel af biler igen. Både parkeringspladsen på Bønnelyckes Plads samt parkeringspladsen på Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde blev behandlet efter denne fremgangsmetode.

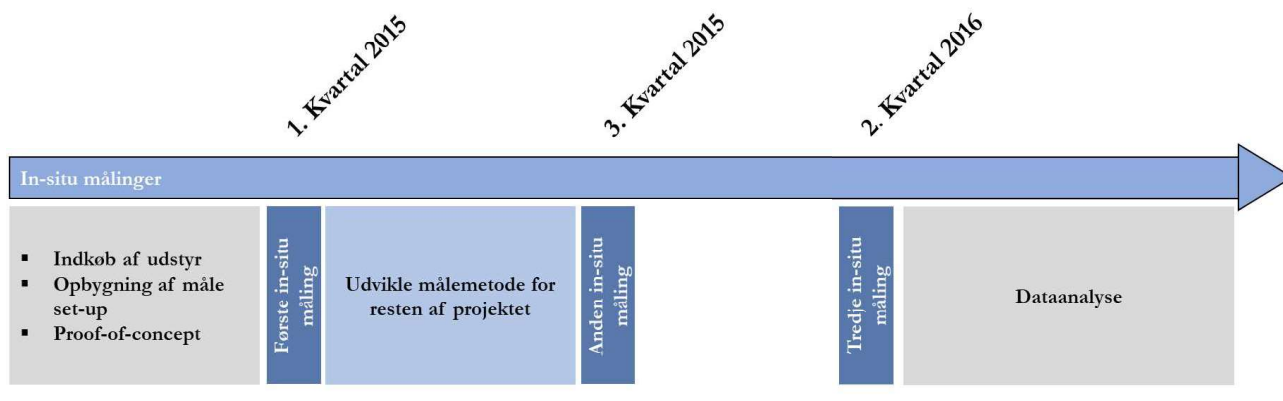
Figur 37: Tørring af parkeringspladsen



6.5. Målinger

Parkeringspladserne blev appliceret den 29. september 2014 og de første in-situ målinger blev udført i februar 2015 og hermed efter, at den nyudviklede måde til at måle aktiviteten af fotokatalytiske arealer in-situ var valideret, se afsnit 6.3. Dermed foregik den første reelle måling af aktiviteten på parkeringspladserne efter en vinter med frost og sne. I nedenstående figur er det kort skitseret, hvornår der er foretaget målinger på parkeringspladserne.

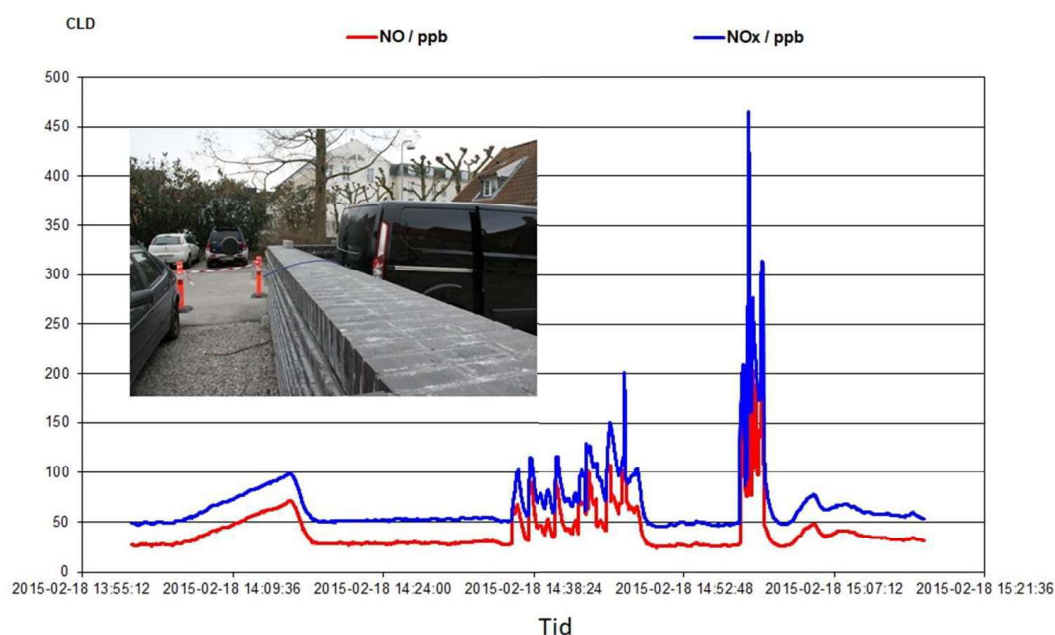
Figur 38: Flowchart for in-situ målinger på parkeringspladserne



6.5.1. Baggrundsmåling

Til at definere NO_x niveauet på parkeringspladserne blev der foretaget en baggrundsmåling uden fotokatalytisk aktivitet. Formålet med denne måling var, at få en fornemmelse af NO_x niveauet på parkeringspladserne. Ud fra de officielle tal ligger Roskilde Kommune lavt i forhold til årsgennemsnittet for NO_x i kommunen. Resultatet kan ses på den følgende figur.

Figur 39: NO_x baggrundsmåling fra Skt. Peder / Skt. Ols Stræde



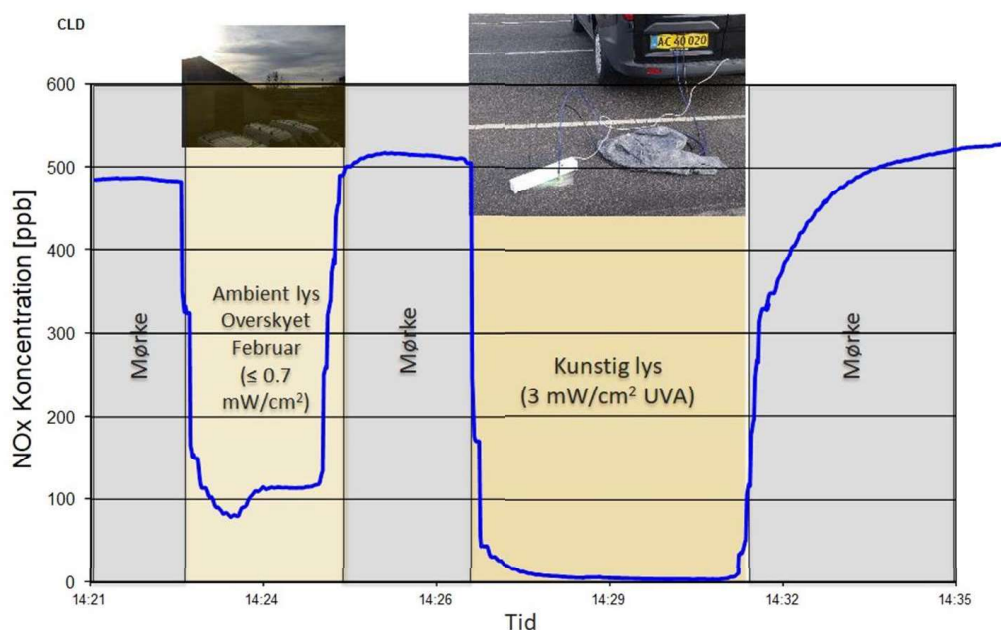
NO_x målingerne på grafen i figur 39 er indsamlet en eftermiddag fra kl. ca. 14.00 til kl. ca. 15.30. Grafen viser, at der først på eftermiddagen eksisterer en forholdsvis stabil koncentration af NO_x. Henimod den periode, hvor der sker aktivitet på parkeringspladsen, omkring kl. 14.30-15.00, opleves en del udsving og nogle mindre NO_x toppe. Efter kl. 15.00, hvor aktiviteten er stor på parkeringspladsen, blev den største NO_x koncentration på ca. 450 ppb målt. I denne periode var der særligt meget ind- og udkørselstrafik på parkeringspladsen.

Data fra baggrundsmålingerne viser, at der er en gennemsnitlig NO_x værdi på omkring 50 ppb, men når der forekommer hyppig trafik på parkeringspladsen findes en næste 10-dobling af gennemsnitsværdien og dermed helt op til 500 ppb. Det vælges derfor at anvende en koncentration på modelgassen i aktivitetsforsogene i området 500 ppb for at simulere de største belastningerne på parkeringspladsen.

6.5.2. In-situ aktivitetsmålinger

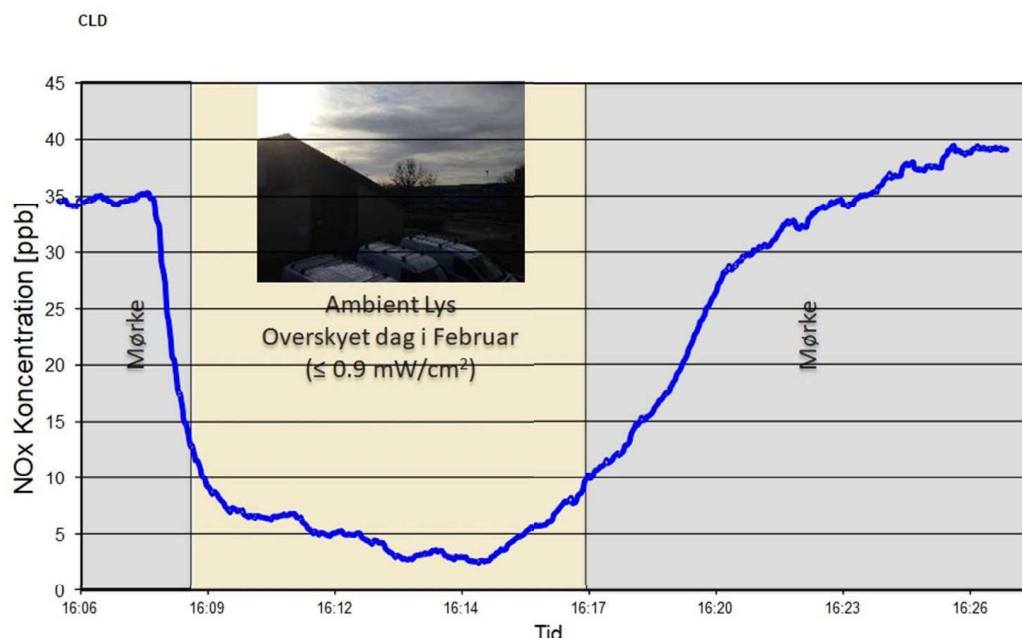
I februar 2015 udføres de første in-situ målinger på de NO_xOFF behandlede parkeringspladser i Roskilde kommune. Den anvendte metode er som beskrevet i afsnit 6.3. Første måling udføres med en modelgas, som simulerer et maksimalt NO_x niveau på 500 ppb. Derudover udføres der forsøg; først med ambient lys, hvor UVA intensiteten blev målt til 0,7 mW/cm² UVA. Herefter måles aktiviteten ved en lysintensitet på 3,0 mW/cm² UVA med en kunstig lyskilde. Målingerne er vist på den følgende figur. Data i figur 40 viser, at der eksisterer en umiddelbar høj NO_x reduktion på parkeringspladserne, både på en overskyet dag i februar med en relativ lav UV indstråling samt ved en UV belysning simulerende en solskinseftermiddag, observeres en stor reduktion af NO_x niveauet grundet den fotokatalytiske NO_x behandling. Fra grafen i figur 40 er det tydeligt, at i det øjeblik der kommer sol på NO_xOFF behandlingen, starter nedbrydelsen af NO_x.

Figur 40: Første in-situ måling i februar 2015 med modelgas



Efter forsøgene med modelgas og et NO_x niveau i området 500 ppb, blev der gennemført et forsøg, hvor der anvendes luft fra de omgivende arealer. Dette er vist på den følgende figur.

Figur 41: Første in-situ måling i februar 2015 med ambient luft



Figur 41 viser, at den omgivende luft i det viste eksempel har en NO_x koncentration på ca. 35-40 ppb. Det er vanskeligt at få en helt præcis måling over lang tid, da NO_x niveauet i den omgivende luft svinger meget. Det ses i grafen, at med NO_x fra den omgivende luft samt anvendelse af lyset fra solen, ambient lys, eksisterer en markant fjernelse af NO_x fra byrummet. I det viste eksempel blev ca. 90 % af den NO_x, der passerede NO_x cellen nedbrudt.

De første in-situ forsøg, vist og behandlet i figur 40 og figur 41, viser, at den udviklede metode til test og evaluering af aktiviteten af de NO_xOFF behandlede parkeringspladser fungerer efter hensigten. Det er muligt både at analysere og visualisere fjernelse af NO_x med ambient betingelser, samt udføre mere kontrollerede forsøg til kvantificering af NO_x fjernelsen ved brug af modelgas og kunstigt lys. Det udviklede in-situ forsøgs set-up vil derfor blive anvendt til løbende at teste aktiviteten af de behandlede parkeringspladser. I det følgende afsnit vil det blive beskrevet, hvordan disse forsøg kvantificeres og hvordan holdbarheden af den udførte behandling evalueres.

6.6. Databehandling

Som tidligere nævnt i kapitel 4, følger NO_x oxidationen, ved hjælp af fotokatalyse, en første-ordens kemisk reaktionskinetik. Det er derfor interessant, at udregne reaktionskoefficienten, k_{rxn} , for tre forskellige situationer. Første situation er behandlingen af data fra ISO-testen, hvor reaktionskoefficienten af katalysatoren under kontrollerede forhold findes. De to andre situationer er in-situ målinger med en henholdsvis høj og lav koncentration af NO_x for at sammenligne katalysatorens aktivitet med ISO-testen samt for at bestemme, om reaktionen fortsat følger en første-ordens kinetik ved en højere belastning af katalysatoren. Foruden førsteordensreaktionskoefficienten er det også interessant at udregne uptake koefficienten, γ -værdien, for

katalysatoren i alle tre situationer, da denne værdi er enhedsløs og dermed giver et bedre sammenligningsgrundlag for katalysatoren under forskellige forhold. Se kapitel 4 for beskrivelse af matematikken og udregningsgrundlaget for både førsteordenskoefficienten og γ -værdier.

6.6.1. Beregningssituation 1 – ISO 22197-1 test

For en beskrivelse af katalysatoren på asfalt, undersøgt med ISO-testcelle under laboratorieforhold, henvises til figur 28 i afsnit 6.2.2.5. Forsøgscellen er 5 cm bred, 10 cm lang og med 0,5 cm frihøjde over prøven. Flowhastigheden af gassen er 3 L/min. Dette giver en reaktionstid på 0,5 s. I ISO-testen er startkoncentrationen 998 ppb og slutkoncentration er 890 ppb. Dette giver en førsteordensreaktionskoefficient på:

$$k_{\text{rxn}} = -\frac{\ln\left(\frac{c_t}{c_0}\right)}{t_{\text{rxn}}} = -\frac{\ln\left(\frac{0,890 \text{ ppm}}{0,993 \text{ ppm}}\right)}{0,5 \text{ s}} = 0,219 \text{ s}^{-1}$$

Hvilket giver en uptakeværdi på:

$$\gamma = \frac{4k_{\text{rxn}}}{v \cdot S_{\text{aktiv}}/V} = \frac{4 \cdot 0,219 \text{ s}^{-1}}{\sqrt{\frac{8 \cdot 8,314 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 300 \text{ K}}{\pi \cdot 0,03 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} \cdot \frac{0,05 \text{ m} \cdot 0,10 \text{ m}}{0,05 \text{ m} \cdot 0,10 \text{ m} \cdot 0,005 \text{ m}}}} = 9,55 \times 10^{-6}$$

6.6.2. Beregningssituation 2 – in-situ test med lav NO_x koncentration

For at se en beskrivelse af katalysatoren på asfalt in-situ med en lille koncentration henvises til figur 41. Her er forsøgscellen 9,5 cm bred, 56 cm lang og med 0,8 cm frihøjde over parkeringspladsen. Luftgennemstrømningshastigheden er den samme som i ISO-testen med 3 L/min. Dette giver en reaktionstid på 8,5 s. Med en start og en slut koncentration på hhv. 35ppb og 5 ppb kan førsteordensreaktionskoefficienten udregnes til:

$$k_{\text{rxn}} = -\frac{\ln\left(\frac{c_t}{c_0}\right)}{t_{\text{rxn}}} = -\frac{\ln\left(\frac{0,005 \text{ ppm}}{0,035 \text{ ppm}}\right)}{8,5 \text{ s}} = 0,229 \text{ s}^{-1}$$

Med en tilhørende uptakeværdi på:

$$\gamma = \frac{4k_{\text{rxn}}}{v \cdot S_{\text{aktiv}}/V} = \frac{4 \cdot 0,229 \text{ s}^{-1}}{\sqrt{\frac{8 \cdot 8,314 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 300 \text{ K}}{\pi \cdot 0,03 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} \cdot \frac{1}{0,008 \text{ m}}}} = 15,9 \times 10^{-6}$$

6.6.3. Beregningssituation 3 – in-situ test med høj NO_x koncentration

For katalysatoren på asfalt i in-situ testen med en stor koncentration er alle parametrene for forsøgscellen de samme, som i beregningseksempel 2. Med en startkoncentration på 510 ppb og en slutkoncentration på 110 ppb er førsteordensreaktionskoefficienten:

$$k_{\text{rxn}} = -\frac{\ln\left(\frac{c_t}{c_0}\right)}{t_{\text{rxn}}} = -\frac{\ln\left(\frac{110 \text{ ppb}}{510 \text{ ppb}}\right)}{8,5 \text{ s}} = 0,180 \text{ s}^{-1}$$

Dette giver en uptakeværdi på:

$$\gamma = \frac{4k_{\text{rxn}}}{v \cdot S_{\text{aktiv}}/V} = \frac{4 \cdot 0,180 \text{ s}^{-1}}{\sqrt{\frac{8 \cdot 8,314 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 300 \text{ K}}{\pi \cdot 0,03 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} \cdot \frac{1}{0,008 \text{ m}}}} = 12,6 \times 10^{-6}$$

De tre forsøg viser alle sammenlignelige γ -værdier, hvilket er forventet, da det på alle tre prøver er den samme katalysator, samme mængde katalysator og samme underlag (asfalt fra Roskilde kommune).

Tabel 2 Sammenfatning af reaktions- og gamma koefficienterne for de tre beregningssituationer.

	Beregningssituation 1 ISO 22197-1	Beregningssituation 2 In-situ – lav NO _x konc.	Beregningssituation 3 In-situ – høj NO _x konc.
k_{rxn}	0,219 s ⁻¹	0,229 s ⁻¹	0,180 s ⁻¹
γ	9,55·10 ⁻⁶	15,9·10 ⁻⁶	12,6·10 ⁻⁶

Tallene i tabel 2 viser, at der er stor overensstemmelse mellem reaktions- og gamma koefficienterne for de tre beregningssituationer. Det betyder, at det er muligt at anvende data opnået i laboratoriet og overføre det til 'real life', da både reaktions- og gamma koefficienterne kan overføres. Derudover, hvis man sammenligner beregningseksempel 2 og 3, det vil sige forsøg med en lav og høj NO_x koncentration, viser det sig, at den fotokatalytiske reaktion er uafhængig af start koncentrationen og giver sammenlignelige reaktions- og gamma koefficienter.

Sammenligner man med andre γ -værdier, fundet i litteraturen, viser disse udregninger, at Photocats katalysator til NO_x oxidation er god og blandt de bedste på markedet (Ifang, et al., 2014) (Ndour, et al., 2008), (Dalton, et al., 2002) (Finlayson-Pitts & Pitts, 2000), (Laufs, et al., Conversion of nitrogen oxides on commercial photocatalytic dispersion paints, 2010), (Ammann, Pöschl, & Rudich, 2002), (Zouzelka & Rathousky, 2017).

I det følgende vil uptake koefficienten blive beregnet for alle in-situ målinger over den to år lange måleperiode i Roskilde Kommune og fra disse data vil holdbarheden blive evalueret.

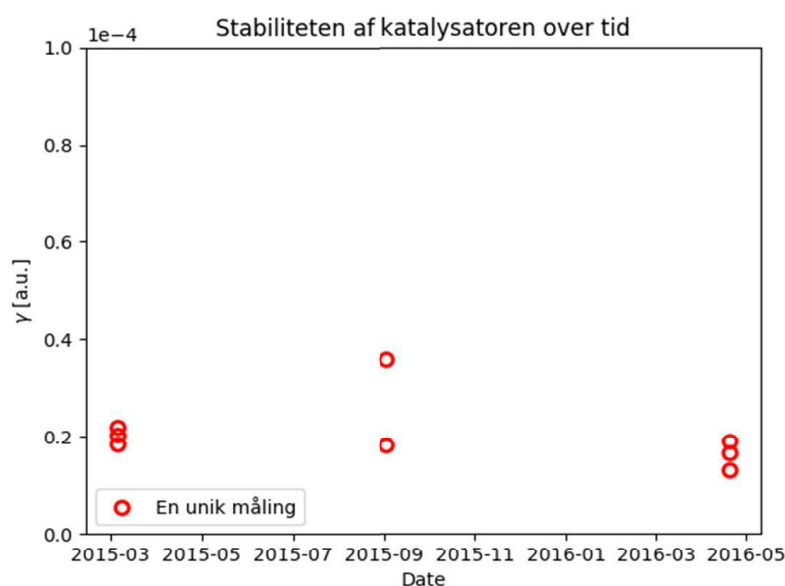
6.6.4. Stabilitetsvurdering ud fra γ -værdi

Da uptake koefficienten, γ , er en enhedsløs størrelse, som beskriver aktiviteten af en katalysator, kan denne størrelse bruges som en indikator på stabiliteten af katalysatoren over tid. I figur 42 er flere unikke målinger plottet som funktion af tid. Det er in-situ målingerne over den 2-årige måleperiode i Roskilde Kommune projektet. Op ad y-aksen plottes γ -koefficienten og ud af x-aksen er tiden plottet fra begyndelsen af 2015 til midten af 2016. Vi kan heraf aflæse, at katalysatorens uptake koefficienter er sammenlignelige, hvilket er i overensstemmelse med tidligere degraderingsforsøg med QUV se afsnit 6.2.2.5. I løbet af et år forandrer katalysatoren sig på femte decimalen. Målingerne skal tilskrives usikkerheder fra temperaturen, vejret og ujævnheder i vejen, som giver et større overfladeareal end beregnet. Dette skyldes, at væsken i pilotforsøget er blevet appliceret med hånden, og målingerne er ikke udført på samme position, fordi pakeringspladsen var i brug under hele forsøgsperioden, og biler blokerede forskellige parkeringsbåse.

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 NO_xOFF behandlede overflader stadig er aktive.

I det følgende vil ovenstående data af reaktions- og gamma koefficienterne samt holdbarhedsdata blive brugt til at beregne den miljømæssige gevinst ved at have appliceret 5.000 m² aktiv asfaltbelægning i Roskilde kommune.

Figur 42: Uptake koefficienten som funktion af tid i Roskilde Kommune projektet



6.6.5. Udregning af potentiale fra ISO-testdata

For at vurdere de samlede positive miljøeffekter skal det estimeres, hvor meget NO_xOFF parkeringspladserne til sammen fjerner af NO_x om året. Dette kan gøres ud fra målinger fra ISO-testen, som er tidligere beskrevet i afsnit 6.6.1, da disse målinger er lavet under laboratoriekontrollerede forhold, hvormed der er god forståelse og mulighed for at styre hvilke effekter, som er i spil. Fra ISO-testen kan effekten af NO_xOFF behandlingen kvantificeres som funktion af lysindstrålingen. Denne viden kan direkte relateres til den specifikke case i Roskilde og ud fra viden om solindstrålingen i Roskilde per år, kan den forventelige fjernelse af NO_x om året beregnes.

I afsnit 6.2.2.5 i figur 28 fremgår det af ISO-testen af Photocat TC 400 Asfalt, at katalysatoren fjerner 0,11 ppmv NO fra gassen. Dette kan omregnes med idealgasloven ($PV = nRT$) til 0,1342 mg/m³ gennem omregningsfaktoren 1 ppmv = 1,23 mg/m³ for NO.

Da volumenet i ISO-testen er 0,05 m × 0,005 m × 0,1 m = 0,000025 m³ giver det en samlet masse på 0,000003355 mg. Arealet, som bliver belyst, og derfor er aktivt i ISO-testen, er 0,1 m × 0,05 m = 0,005 m² og med et gasflow på 3 L/min, svarende til 0,18 m³/time, bliver der fjernet $4,83 \frac{\text{mg[NO]}}{\text{m}^2 \text{ time}}$. Med et samlet areal på 5.000 m² fjerner parkeringsarealet $24,2 \frac{\text{g[NO]}}{\text{time}}$.

Dette tal kan så gøres op på forskellig vis for at finde den totale mængde NO fjernet fra luften på et år. En måde vil være at gange op med antal solskinstimer på et år, som er ca. 1.700 årligt. Dette giver en total fjernelse på 41 kg/år. Tallet er et udtryk for en nedre grænse over, hvor meget der bliver fjernet om året. Da forskellige solskinstimer indeholder forskellig mængde UV-lys, vil et bedre estimat være givet ud fra effekten afsat på jorden fra solen.

For at tage højde for effekten i sollyset fremfor blot antallet af solskinstimer, laves en beregning, hvor der omregnes fra $\frac{\text{mg[NO]}}{\text{m}^2 \text{ time}}$ til $\frac{\text{mg[NO]}}{\text{kWh UVA}}$. I ISO standarden udføres forsøget med en lyseffekt af UVA lys på 1mW/cm² svarende til

10 W/m². Dette giver muligheden for at omregne fra $4,83 \frac{\text{mg[NO]}}{\text{m}^2 \text{ time}}$ til $\frac{4,83 \frac{\text{mg[NO]}}{\text{m}^2 \text{ time}}}{10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 0,483 \frac{\text{mg[NO]}}{\frac{\text{m}^2}{\text{Wh}}}$ svarende til $0,483 \frac{\text{g[NO]}}{\text{kWh}}$.

For at beregne den totale masse NO fjernet, bruges nu effekten afsat på jorden fra solen på et år fremfor antallet af solskinstimer på et år. Der kommer ca. 1.000 kWh/m² sollys på et år fra solen i området omkring Roskilde og resten af Danmark. Af dette er ca. 5 % UV lys (Eriksen, 2007). Dette giver 50 kWh/m² sollys på et år, som bidrager til nedbrydelsen af NO_x. Med dette estimat fjerner katalysatoren på parkeringspladserne;

$$0,483 \frac{\text{g[NO]}}{\text{kWh}} \cdot 50 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ år}} = 24,2 \frac{\text{g[NO]}}{\text{m}^2 \text{ år}}$$

hvilket medfører en total fjernelse for hele parkeringspladsen på 120 kg[NO] per år. Dette giver et øvre estimat for, hvor meget NO_x parkeringspladserne tilsammen kan fjerne på et år. Yderligere korrigeret for estimatet kan foretages ved at tage modellen ”*Corrective For GencumulativeSkyModel*” i brug. Denne model kan beregne indstrålingen på en specifik overflade i Danmark og solens indfaldsstråler vil tilsammen afgive en effekt på ca. 586 kWh/m² pr. år. Dette giver et samlet estimat af hvor meget NO_x parkeringspladserne fjerner på:

$$24,2 \frac{\text{g[NO]}}{\text{m}^2 \text{ år}} \times \frac{568 \text{ kWh}}{1.000 \text{ kWh}} \times 5.000 \text{ m}^2 \approx \mathbf{69 \text{ kg.}}$$

6.7. Delkonklusion

Der er flere måder at beregne udbytte tallene fra NO_xOFF parkeringspladserne på, som vist i dette kapitel. Det centrale er dog, at fotokatalyse har en effekt og aktivitetstal fra ISO-testen kan overføres direkte til arealer i byrummet. Derudover er den drivende kraft bag den fotokatalytiske proces mængden af sollys, der rammer et specifikt område. Målingerne fra parkeringspladserne viser, at der fjernes $0,483 \frac{\text{g[NO]}}{\text{kWh}}$. Solens effekt afsat på jorden i Danmark er med modellen ”*Corrective For GencumulativeSkyModel*” 563 kWh/m², hvilket svarer til, at Roskilde kommune renses luften for 13,8 g/m² om året, hvilket omregnet udgør 69 kg for de behandlede parkeringsarealer om året. Mængden af NO_x fjernet fra parkeringspladserne om året vil i næste kapitel blive anvendt i en Samfundsøkonomisk analyse, som beregner de samfundsmæssige gevinster for Roskilde kommune ved at anvende aktive NO_xOFF overflader i byrummet.

7. Samfundsøkonomisk analyse af NO_x reduktion ved brug af NO_xOFF teknologien

Den samfundsøkonomiske analyse og teknologiens virke evalueres i nedenstående ved brug af en scenarie opdelt cost-benefit analyse som suppleres med en Monte Carlo simulering. Baggrunden for at anvende en scenariebaseret tilgang er at forstå, hvordan de tekniske og samfundsøkonomiske variabler påvirker hinanden samt hvilke potentielle effekter Roskilde kommune kan opnå ved brug af NO_xOFF teknologien i et bredere omfang.

På baggrund af resultaterne fra den toårige real-life test i Roskilde kommune samt omfattende litteratur om de sundhedsmæssige og økonomiske konsekvenser af NO_x forurening er det muligt at beregne hvilken velfærdsøkonomisk indflydelse NO_xOFF teknologien har. På denne baggrund viser herværende analyse, hvor store velfærdsøkonomiske fordele der kan opnås ved implementering af NO_xOFF teknologien.

Vurderingen af hvilke samfundsøkonomiske effekter, som implementeringen af NO_xOFF i områder med høje NO_x koncentrationer i Roskilde kan tilvejebringe, afhænger af forskellige faktorer, hvoraf mange har en statistisk usikkerhedsmargin. Eksempler herpå er som følger; sundhedsmarkeringerne relateret til NO_x, nedbrydelsesevnen af NO_xOFF teknologien og omkostninger ved implementering af teknologien.

De anvendte modeller i denne analyse følger de generelle retningslinjer for miljømæssige investeringer, som er udarbejdet af Miljøstyrelsen og Finansministeriet. Derudover fremstiller de nedenstående afsnit forskellige scenarier, som både indeholder miljømæssige- og velfærdsøkonomiske fordele ved implementering af NO_xOFF teknologien på henholdsvis Bønnelyckes Plads og Skt. Peder Stræde, nye mulige områder samt potentialet for at gennemføre en vedvarende implementering af teknologien.

7.1. Metode

Miljøstyrelsen anbefaler to metoder til at beregne om hvorvidt miljømæssige investeringer er rentable; *cost-effectiveness* - og *cost-benefit analyse*. Nærværende analyse er baseret på *cost-benefit* metoden da det nødvendige analytiske fundament er udarbejdet (Se kapitel 3 og 6).

7.1.1. Cost-Benefit analyse

Cost-benefit analysen kræver, at de miljømæssige aspekter kan kvantificeres til en økonomisk værdi. Dette udgør grundlaget for at kunne sammenligne med de eksisterende investeringer. Analysen fremviser hermed den samfundsmæssige værdi af en investering. En sådan vurdering er særlig relevant, når der anvendes forskellige instrumenter til at løse en problemstilling, da det fremhæver hvilke instrumenter, der medfører en samfundsmæssig gevinst eller -tab og i hvilken størrelsesorden. Ifølge retningslinjerne fra Miljøstyrelsen og Finansministeriet inkorporerer cost-benefit analysen nettoafgiftsfaktoren og skatteforvridningstab. Afslutningsvis beregnes nutidsværdien for implementeringen af NO_xOFF teknologien.

7.1.1.1. Diskontering

Alle investeringer og samfundsmæssige besparelser benytter en diskonterings rente på 4 % i vores tre hovedscenarier (Finansministeriet, 2017, s. 44) . I vores Monte Carlo simulering vil en rente mellem 3 % og 4 % benyttes, der er for eksempel anbefalet fra både CONCITO og Det Økologiske Råd at diskonteringsrenten bør starte på 3 % for så at falde ned mod 1 % alt efter tidshorisonten (Det Økologiske Råd, 2013).

7.1.1.2. Nettoafgiftsfaktor

Da det i mange tilfælde er vanskeligt at få kendskab til de endelige markeds- eller købspriser for de mistede forbrugsgoder benyttes en ”genvejs” løsning, som udtrykker det generelle afgiftsniveau i samfundet. Denne kaldes nettoafgiftsfaktoren og er teknisk beregnet som værditilvæksten i samfundet opgjort i henholdsvis køberpriser og faktorpriser. Dette forhold er af Finansministeriet opgjort til at ligge på 1,325 (Finansministeriet, 2017).

7.1.1.3. Skatteforvridningstab

Skatteforvridningstab er udtryk for det velfærdstab, som forekommer ved at finansiere offentlige udgifter gennem skatteopkrævning. Redistribuerende af skattekrone, som ellers var øremærket andre områder, påvirker den generelle økonomi. Marginalomkostningen for samfundet i hensyn til skatteforvridningen er fastsat til 10 % (Finansministeriet, 2017).

7.1.2. Model antagelser

7.1.2.1. Inflation

Danmarks nationalbanks hovedformål er at sikre stabile priser. Dette gøres ved at effektuere en pengepolitik som holder inflationen stabil. Det officielle mål med pengepolitik er at holde inflationen tæt på eller under 2 % (Danmarks Nationalbank, 2017). Siden 1993 har den årlige danske inflation været mellem 0,3 % og 3,4 % (Dansk Statistik, 2017). Hvert scenarie i nedenstående analyse er vurderet på baggrund af den gennemsnitlige inflation i de sidste 10 år på 1,6 %.

Tabel 3: Inflation mellem 1993 og 2016

	5Y avg.	10Y avg.	15Y avg.	Historical MIN	Historical MAX
Inflation	0,9 %	1,6 %	1,7 %	0,3 %	3,4 %

Kilde: Dansk statistik, 2017

7.1.2.2. Samfundsmæssige sundhedsmkostninger per kg NO_x

Den nyeste beregning af de samfundsmæssige sundhedsmkostninger per kg NO_x fra 2016 er fastsat til DKK 184 af DCE (Danish Center for Environment and Energy, 2016). Der eksisterer dog adskillige kilder, som er fortalere for, at prisen per kg NO_x er væsentlig højere i tætbefolkede områder (Department for Environment, Food & Rural Affairs, 2015; Transportøkonomisk institutt: Stiftelsen Norsk senter for samferdselsforskning, 2014). I Norge er prisen for et kg NO_x for eksempel fastsat til at være NOK 320 (NOK-2012) i Oslo, Bergen og Trondheim.

Efter dialog med DCE og efter at værdien for et statistikliv i Danmark er øget fra 18 mio. kr. til 32 mio. kr. vil sundhedsmkostningerne forbundet med NO_x øge. En lineær relation tilsiger at sundhedsmkostningerne forbundet med 1 kg/NO_x vil stige til omkring 327 kr. Gennem dialog med DCE skønnes det dog, at sundhedsmkostningen per kg/NO_x vil øges med ca. 50 % til 276 kr. Det skal også tilføjes, at denne omkostning udelukkende relaterer sig til NO_x bidraget til partikel dannelse, og at dette ikke er et officielt opdateret estimat fra DCE.

Udover NO_x bidraget til partikel dannelse er der også stigende konsensus, for at NO₂ bidrager til tabte liv i Danmark. Med baggrund i seneste rapport for luftkvalitet i Europa fra EEA vurderes den sundhedsmæssige omkostning forbundet med NO₂ i Danmark per 100,000 indbygger (European Environment Agency, 2017). EEA opstiller to scenarier baseret på baggrundskoncentrationer på henholdsvis 10 µg NO₂/m³ og 20 µg NO₂/m³. Her skønnes de samfundsmæssige omkostninger at ligge på mellem 33,8 mio. kr. til 198,9 mio. kr. per 100.000 indbyggere.

For at inkludere disse estimater i cost-benefit analysen omregnes de sundhedsmæssige omkostninger til et kg/NO_x estimat. Et officielt estimat fra DCE forventes senere i 2018/19 hvorfor der er en usikkerhed forbundet med metoden og antagelserne benyttet nedenfor.

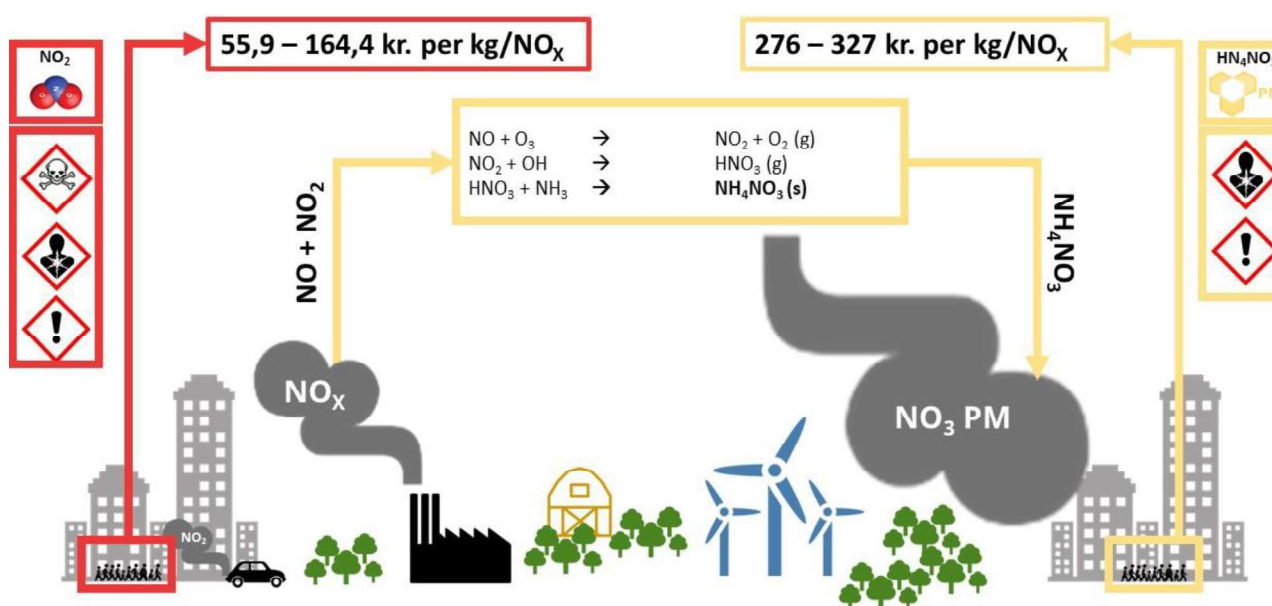
Den lokale NO₂ forurening i Roskilde Kommune blev i 2014 estimeret af DCE til at udgøre omkring 1.210.000 kg/NO_x (Danish Centre for Environment and Energy, 2014). I vores estimering antager vi, at den lokale sundhedsmæssige omkostning forbundet med NO₂ udelukkende afhænger af den lokale NO_x udledning. I begge af EEAs scenarier er der stadig NO₂ i luften, og der er en usikkerhed for hvornår NO₂ koncentrationen er så lav, at den ikke fører til samfundsøkonomiske omkostninger. EEAs scenarier er baseret på 10 µg NO₂/m³ og 20 µg NO₂/m³. Da NO₂ er toksisk, er det klart, at et hvert kilogram, der fjernes, har en positiv sundhedseffekt.

Hvis det antages at baggrundskoncentration sænkes til 10 µg NO₂/m³, hvilket er et realistisk niveau, og at dette kan opnås ved at alle lokale NO₂ emissioner neutraliseres, giver det en omkostning per kg NO₂ på 164,4 kr.

$$\frac{198,9 \text{ mio. kr.}}{1.210.000 \text{ kg}} = 164,4 \text{ kr/kg}$$

De totale samfundsøkonomiske omkostninger per kg. NO_x skønnes dermed at ligge mellem 440,4 kr. og 491,4 kr. Hvor mellem 33 % og 37 % tilfalder lokalt. I cost-benefit analysens tre forskellige scenarier benyttes en samlet samfundsøkonomisk effekt på 440,4 kr. per kg NO_x. I Monte Carlo simuleringen tages der højde for usikkerhed forbundet med estimaterne. Den lokale sundhedsmæssige omkostning per kg NO_x vurderes i intervallet 55,9 kr. og 164,4 kr. mens NO_x bidraget til partikeldannelse vurderes i intervallet 276 til 327 kr. per kg/NO_x.

Figur 43: NO_x og dens skadevirkninger lokalt [NO₂] og globalt [NH₄NO₃]



7.1.2.3. NO_x reduktion per m²

Resultaterne fra in-situ målingerne på både Bønnelyckes Plads og Skt. Peder / Skt. Ols Stræde i Roskilde viser et stort potentiale for NO_x nedbrydelse. Den præcise størrelse afhænger af forskellige faktorer såsom lysintensitet. Resultaterne fra de to parkeringspladser viser et reduktionspotentiale på mellem 8,2 og 13,8 gram NO_x om året per m². Disse vurderes at være repræsentative for Roskilde by og vil i nærværende analyse blive anvendt til at belyse den samfundsmæssige indflydelse af NO_xOFF teknologien både i pilotprojektet og som en generel implementering i byens infrastruktur.

Cost-benefit modellen tager yderligere forbehold for et fald på 20 % i effektivitet over de 15 år. Photocat forventer, at et normalt fald i effekt vil være på ca. 10 %, hvilket understøttes af de resultater, som Photocat har set hos nuværende kommercielle produkter med Photocats fotokatalytiske løsning. Der er en ekstra usikkerhed vedrørende dette på Bønnelyckes Plads og Skt. Peder / Skt. Ols Stræde, da disse er blevet manuelt behandlet. Færdige kommercielle produkter bliver behandlet i produktion, hvorfor der er en forskel i usikkerhed mellem disse to metoder. Det er denne usikkerhed der ønskes at justere for ved at teste for en højere end normal effektivitets forringelse.

Tabel 4: NO_x reduktion per år, per m², i gram

År:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Worst Case	8.2	7.38	7.32	7.26	7.20	7.14	7.08	7.02	6.96	6.90	6.84	6.78	6.73	6.67	6.62	6.56
Base Case	11.0	9.90	9.82	9.73	9.65	9.57	9.49	9.41	9.33	9.26	9.18	9.10	9.03	8.95	8.87	8.80
Best Case	13.8	12.4	12.3	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.7	11.6	11.5	11.4	11.3	11.2	11.1	11.0

Kilde: Udarbejdet af Photocat A/S

7.1.2.4. NO_xOFF investering per m² (inkl. applicering)

Prisen på pilotprojektet er ikke anvendelig ved en generel implementering af NO_xOFF teknologien i Roskilde, da den også inkluderer et treårigt studie, som måler luftkvaliteten og en samfundsmæssig konsekvensvurdering. Prisen per m² for pilotprojektet udgjorde DKK 60. Videre er den NO_xOFF løsning, som vurderes i denne rapport, påført manuelt. En anden metode for at implementere NO_xOFF løsningen i byrummet er, at når nye fortovsfliser lægges, så er disse behandlet med NO_xOFF i produktionen.

Den nuværende pris for NO_xOFF teknologien er mellem DKK 9 og 10 per m² eksklusive prisen for applicering. Såfremt applicering sker af Kommunens egne vejarbejdere, vil prisen for denne være væsentlig lavere, da appliceringen kan finde sted samtidig med andre vejforbedringer. I dette tilfælde anbefales det, at Kommunen starter med en intern træning af vejarbejderne. Prisen for applicering er estimeret til at udgøre mellem DKK 0,7

og 1,3 per m², hvilket får den totale meromkostning op på mellem 9,7 kr. og 11,3 kr. per m². Hvis Kommunen implementerer NO_xOFF gennem nye fortovsfliser, er den totale meromkostning anslået til mellem 0 og 10 kr. per m². Et eksempel er kunder af Photocat, som producerer produkter med NO_xOFF uden en merpris. Dette er der flere grunde til, men det primære aspekt er, at merprisen i procent er in-signifikant til sammenligning med at vinde et udbud.

Den videre analyse benytter en samlet omkostning for NO_xOFF væske og applicering på mellem 9,7 kr. og 11,3 kr. per m². I en større implementering ville man kunne reducere disse omkostninger yderligere ved for eksempel at indskrive i udbudsmaterialet, at nye fortovsfliser leveres med fotokatalytisk teknologi. Her anbefaler Photocat at udbudsmaterialet stiller krav til den fotokatalytiske effekt i henhold til ISO 22197-1.

7.2. Samfundsøkonomisk projekt evaluering

De to parkeringspladser i Roskilde, Bønnelyckes Plads og Skt. Peder / Skt. Ols Stræde, evalueres samlet. Parkeringspladsernes areal udgør sammenlagt 5.000 m² med en fordeling på henholdsvis 3.800 m² og 1.200 m². Luftkvaliteten på begge parkeringspladser antages til at være på et sammenligneligt niveau, hvilket understøttes af de offentlige tilgængelige estimater udarbejdet af DCE (se kapitel 3).

Nedbrydelsesevnen af de sammenlagte 5.000 m² forventes at befinde sig på et niveau mellem 32,8 kg NO_x og 69 kg NO_x per år i minimum 15 år. For at analysere de samfundsøkonomiske gevinster yderligere anvendes følgende tre analyser; worst-, base- og best-case scenarie som understøttes af en følsomhedsanalysen.

² Beregningen er baseret på en månedsløn på mellem DKK 30.000-40.000 for relevante vejarbejdere samt en appliceringsrate på mellem 200-300 m² per time.

7.2.1. Worst-case scenarie

I worst-case scenariet anvendes en startende nedbrydelseseffekt på 41 kg/NO_x per år, men over en periode på 15 år reduceres til 32,8 kg/NO_x per år.

For at udregne de samfundsøkonomiske gevinster af nedbrydelsen af NO_x anvendes en sats på 164,4 kr. per kg/NO_x for at estimere den lokale effekt og en sats på 276 kr. per kg/NO_x for at estimere den regionale effekt. Prisen for NO_xOFF væsken er sat til 10 kr. per m², mens appliceringsomkostningerne er vurderet til 1,3 kr. per m². Derudover er alle priser tilpasset nettoafgiftsfaktor og skatteforvridningstab på henholdsvis 1,325 og 10 %. Alle estimater er tilpasset inflation, hvilket er fastsat til 1,6 % per år baseret på inflationen de sidste 10 år.

Omkostning per 5000 m² i år 0

$$m^2 * \text{kr. per } m^2 * \text{nettoafgiftsfaktor} * (1 + \text{skatteforvridningstab})$$

$$5000 m^2 * 11,3 \text{ kr. per } m^2 * 1,325 * (1 + 10\%) = 82.349 \text{ kr.}$$

Den oprindelige investering for skat udgør DKK 56.500 svarende til DKK 11,3 per m². Når denne justeres med både nettoafgiftsfaktoren og skatteforvridningstab udgør den oprindelige investering DKK 16,5 per m². Efter den første applicering forekommer der ikke meromkostninger.

De sundhedsmæssige gevinster er opdelt i lokale og regionale. Over en periode på 15 år forventes minimum 563 kg/NO_x på Bønnelyckes Plads og Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde nedbrudt. Nutidsværdien for denne nedbrydelse er estimeret til 70.054 kr. for den lokale effekt (ca. 14 kr. per m²), mens nedbrydelsen er estimeret til at have en regional effekt på 117.609 kr. (ca. 23,5 kr. per m²). Den samlede nutidsværdi per kvadratmeter er dermed vurderet i et worst-case til at udgøre 21 kr. per m².

Nutidsværdi per m² i worst-case

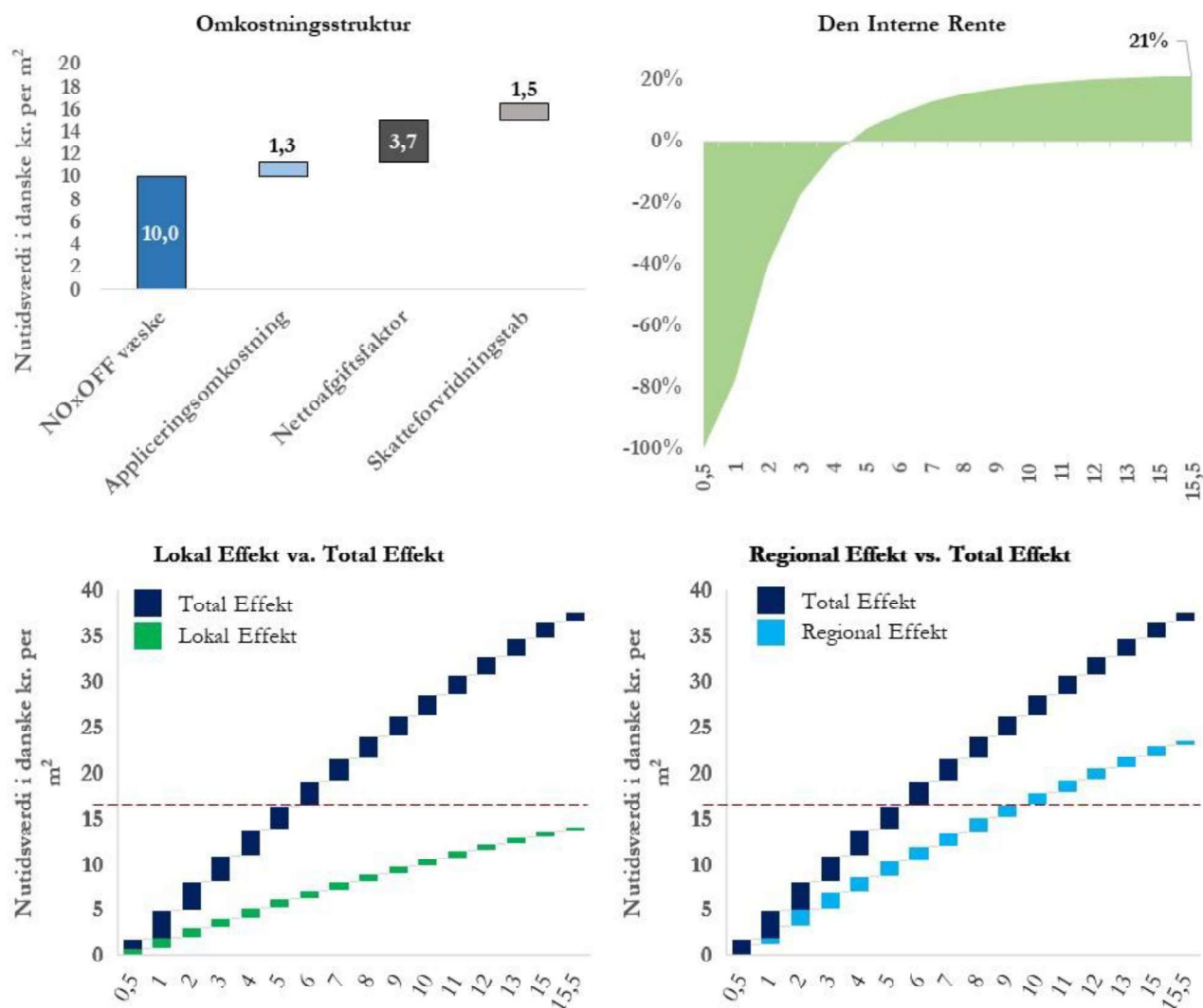
$$\text{nutidsværdi af lokal effekt} + \text{nutidsværdi af regional effekt} - \text{udgift for NO}_x\text{OFF}$$

$$14 \text{ kr.} + 23,5 \text{ kr.} - 16,5 \text{ kr.} = 21 \text{ kr.}$$

I det vurderede scenarie, er NO_xOFF en rentabel investering, når man tager i betragtning både de lokale og regionale effekter af NO_x i luften. Hvis man derimod udelukkende kigger lokalt, er NO_xOFF i dette scenarie ikke rentabelt, da en betragtelig andel af de samfundsøkonomiske besparelser, ved den nedbrudte NO_x, er vurderet at tilfalde udenfor Kommunen.

I det vurderede scenarie, er den interne rente 21 %, hvilket er over 5x mere end den diskonteringsrente, der benyttes og har en afkastratio på 2,3x.

Figur 44: Worst-case scenarie sammendrag



Kilder: Udarbejdet af Photocat A/S

7.2.2. Base-case scenarie

I base-case scenariet anvendes en startende nedbrydelseffekt på 55 kg/NO_x per år, men over en periode på 15 år reduceres til 44 kg/NO_x per år.

For at udregne de samfundsøkonomiske gevinster af nedbrydelsen af NO_x, anvendes en sats på 164,4 kr. per kg/NO_x for at estimere den lokale effekt og en sats på 276 kr. per kg/NO_x for at estimere den regionale effekt. Prisen for NO_xOFF væsken er sat til 10 kr. per m², mens appliceringsomkostningerne er vurderet til 1,0 kr. per m². Derudover er alle priser tilpasset nettoafgiftsfaktor og skatteforvridningstab på henholdsvis 1,325 og 10 %. Alle estimater er tilpasset inflation, hvilket er fastsat til 1,6 % per år baseret på inflationen de sidste 10 år.

Omkostning per 5000 m² i år 0

$$m^2 * \text{kr. per } m^2 * \text{nettoafgiftsfaktor} * (1 + \text{skatteforvridningstab})$$

$$5000 m^2 * 11 \text{ kr. per } m^2 * 1,325 * (1 + 10\%) = 80.163 \text{ kr.}$$

Den oprindelige investering for skat udgør DKK 55.000 svarende til DKK 11,0 per m². Når denne justeres med både nettoafgiftsfaktoren og skatteforvridningstab udgør den oprindelige investering DKK 16,0 per m². Efter den første applicering forekommer der ikke meromkostninger.

De sundhedsmæssige gevinster er opdelt i lokale og regionale. Over en periode på 15 år forventes minimum 706 kg/NO_x på Bønnelyckes Plads og Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde nedbrudt. Nutidsværdien for denne nedbrydelse er estimeret til 98.439 kr. for den lokale effekt (ca. 19,7 kr. per m²), mens nedbrydelsen er estimeret til at have en regional effekt på 165.262 kr. (ca. 33,1 kr. per m²). Den samlede nutidsværdi per kvadratmeter er dermed vurderet i et base-case til at udgøre 36,8 kr. per m².

Nutidsværdi per m² i base-case

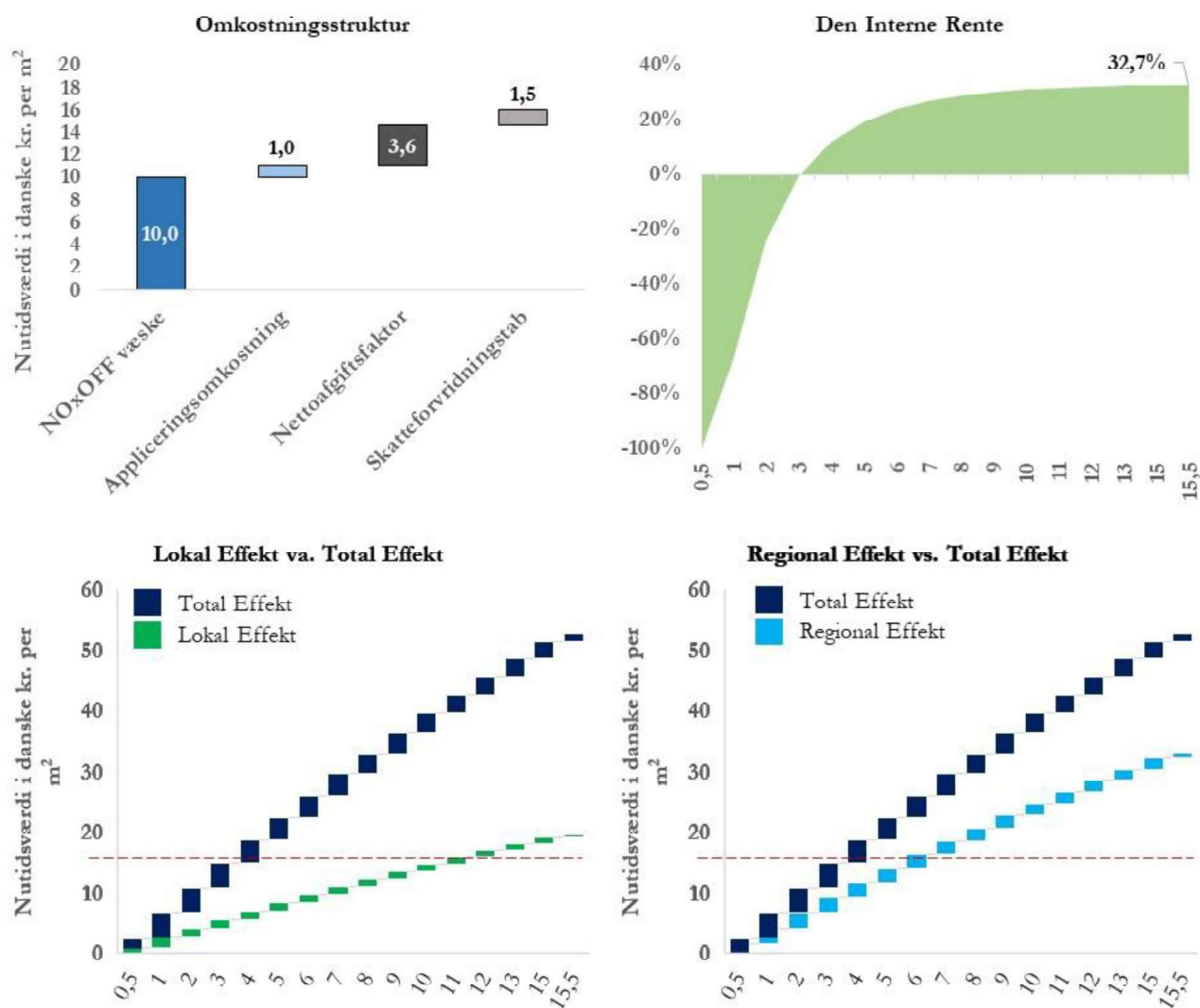
$$\text{nutidsværdi af lokal effekt} + \text{nutidsværdi af regional effekt} - \text{udgift for NO}_x\text{OFF}$$

$$19,7 \text{ kr.} + 33,1 \text{ kr.} - 16,0 \text{ kr.} = 36,8 \text{ kr.}$$

I det vurderede scenarie er NO_xOFF en rentabel investering. Dette er også gældende hvis man alene vurderer ud i fra de lokale effekter.

I det vurderede scenarie, er den interne rente 32,7 %, hvilket er mere end 8x mere end den diskonteringsrente, der benyttes og har en afkastratio på 3,3x.

Figur 45: Base-case scenarie sammendrag



Kilder: Udarbejdet af Photocat A/S

7.2.3. Best-case scenarie

I best-case scenariet anvendes en startende nedbrydelseffekt på 69 kg/NO_x per år, men over en periode på 15 år reduceres til 55,2 kg/NO_x per år.

For at udregne de samfundsøkonomiske gevinster af nedbrydelsen af NO_x anvendes en sats på 164,4 kr. per kg/NO_x for at estimere den lokale effekt og en sats på 276 kr. per kg/NO_x for at estimere den regionale effekt. Prisen for NO_xOFF væsken er sat til 10 kr. per m², mens appliceringsomkostningerne er vurderet til 0,7 kr. per m². Derudover er alle priser tilpasset nettoafgiftsfaktor og skatteforvridningstab på henholdsvis 1,325 og 10 %. Alle estimater er tilpasset inflation, hvilket er fastsat til 1,6 % per år baseret på inflationen de sidste 10 år.

Omkostning per 5000 m² i år 0

$$m^2 * kr. per m^2 * nettoafgiftsfaktor * (1 + skatteforvridningstab)$$

$$5000 m^2 * 10,7 kr. per m^2 * 1,325 * (1 + 10\%) = 77.976 kr.$$

Den oprindelige investering for skat udgør DKK 53.500 svarende til DKK 10,7 per m². Når denne justeres med både nettoafgiftsfaktoren og skatteforvridningstab udgør den oprindelige investering DKK 15,6 per m². Efter den første applicering forekommer der ikke meromkostninger.

De sundhedsmæssige gevinster er opdelt i lokale og regionale. Over en periode på 15 år forventes minimum 885,7 kg/NO_x på Bønnelyckes Plads og Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde nedbrudt. Nutidsværdien for denne nedbrydelse er estimeret til 124.251 kr. for den lokale effekt (ca. 24,9 kr. per m²), mens nedbrydelsen er estimeret til at have en regional effekt på 208.596 kr. (ca. 41,7 kr. per m²). Den samlede nutidsværdi per kvadratmeter er dermed vurderet i et best-case til at udgøre 51 kr. per m².

Nutidsværdi per m² i best-case

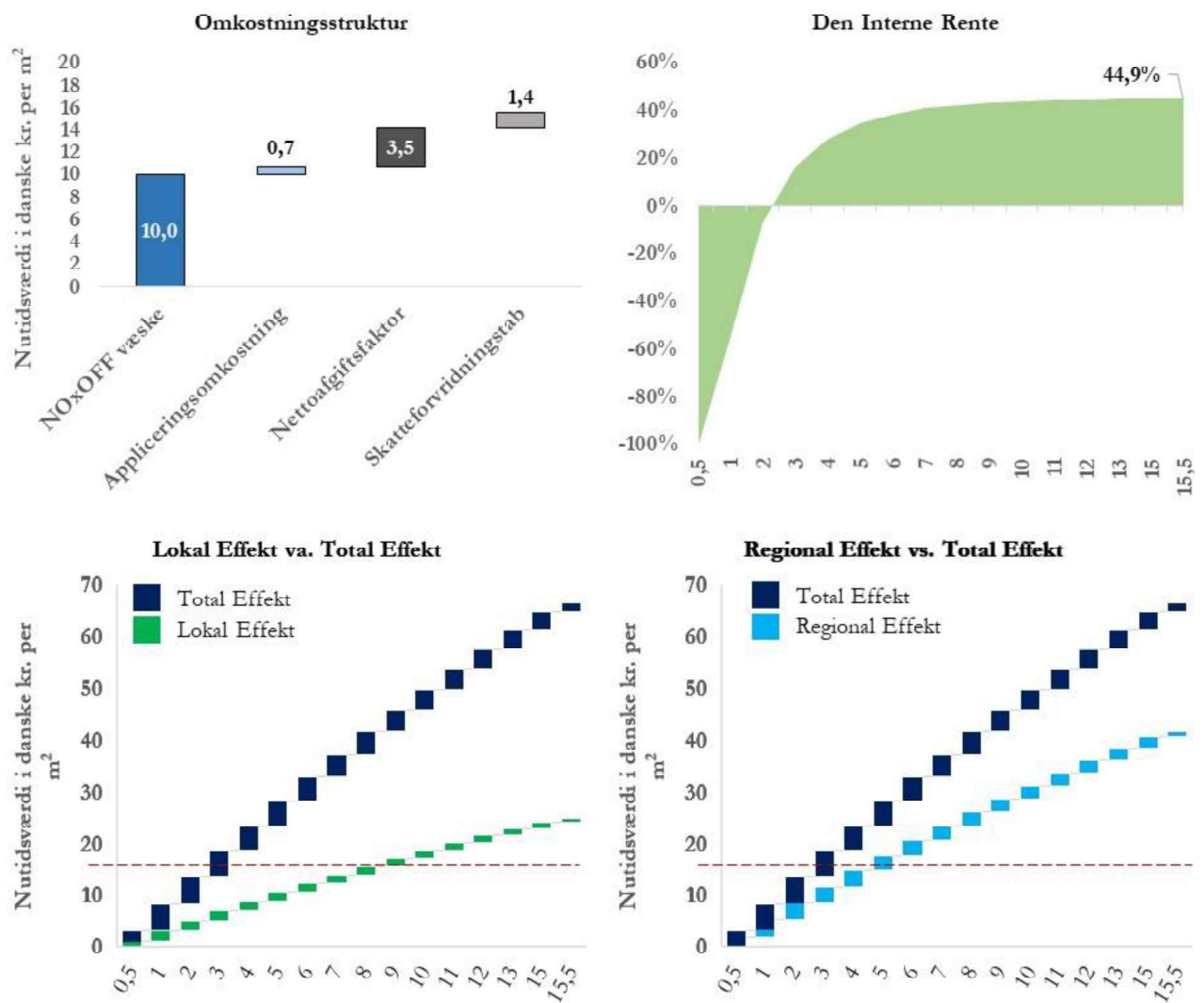
$$nutidsværdi af lokal effekt + nutidsværdi af regional effekt - udgift for NO_xOFF$$

$$24,9 kr. + 41,7 kr. - 15,6 kr. = 51 kr.$$

I det vurderede scenarie er NO_xOFF en rentabel investering. Dette er også gældende, hvis man alene vurderer ud fra de lokale effekter.

I det vurderede scenarie, er den interne rente 44,9 %, hvilket er mere end 11,2x mere end den diskonteringsrente, der benyttes og har en afkastratio på 4,3x.

Figur 46: Best-case scenarie sammendrag



Kilder: Udarbejdet af Photocat A/S

7.2.4. Følsomhedsanalyse

For at forstå det fulde potentiale af de samfundsøkonomiske gevinster fra NO_xOFF implementeringen på Bønnelyckes Plads og Skt. Peder-/ Skt. Ols Stræde, er der udarbejdet 10.000 simuleringer baseret på varierende input parametre. Dette hjælper med at indikere, hvorvidt et worst-, base- eller best-case scenarie er mest sandsynligt. De væsentligste variabler er; de samfundsøkonomiske gevinster per kg NO_x, NO_xOFF's nedbrydelsesevne af NO_x og prisen for applicering af NO_xOFF.

7.2.4.1. De samfundsøkonomiske gevinster per kg NO_x

De væsentligste variabler for de samfundsøkonomiske gevinster per kg NO_x er udregnet af DCE til DKK 184 (Danish Center for Environment and Energy, 2016), men vurderes op-estimeret til mellem DKK 276 og 327 som følge af opjustering af et statistisk livs værdi. Denne pris udgør et vigtigt grundlag for at vurdere om implementeringen af NO_xOFF er profitable. Foruden de regionale omkostninger, som er veldokumenteret af DCE, har EEA også funder lokale omkostninger fra NO₂. Disse omkostninger er ikke ligeså veldokumenteret, men i denne simulering estimeres omkostningerne, på baggrund af EEAs og DCEs rapporten, til at være DKK 55,9 – 164,4.

7.2.4.2. NO_xOFF evne til at nedbryde NO_x

Som nævnt i kapitel 6 er NO_xOFF's evne til at nedbryde NO_x afhængig af forskellige faktorer, hvorfor vi tester denne i et interval fra 32,8 kg NO_x til 69 kg NO_x per år.

7.2.4.3. Prisen for NO_xOFF og applicering

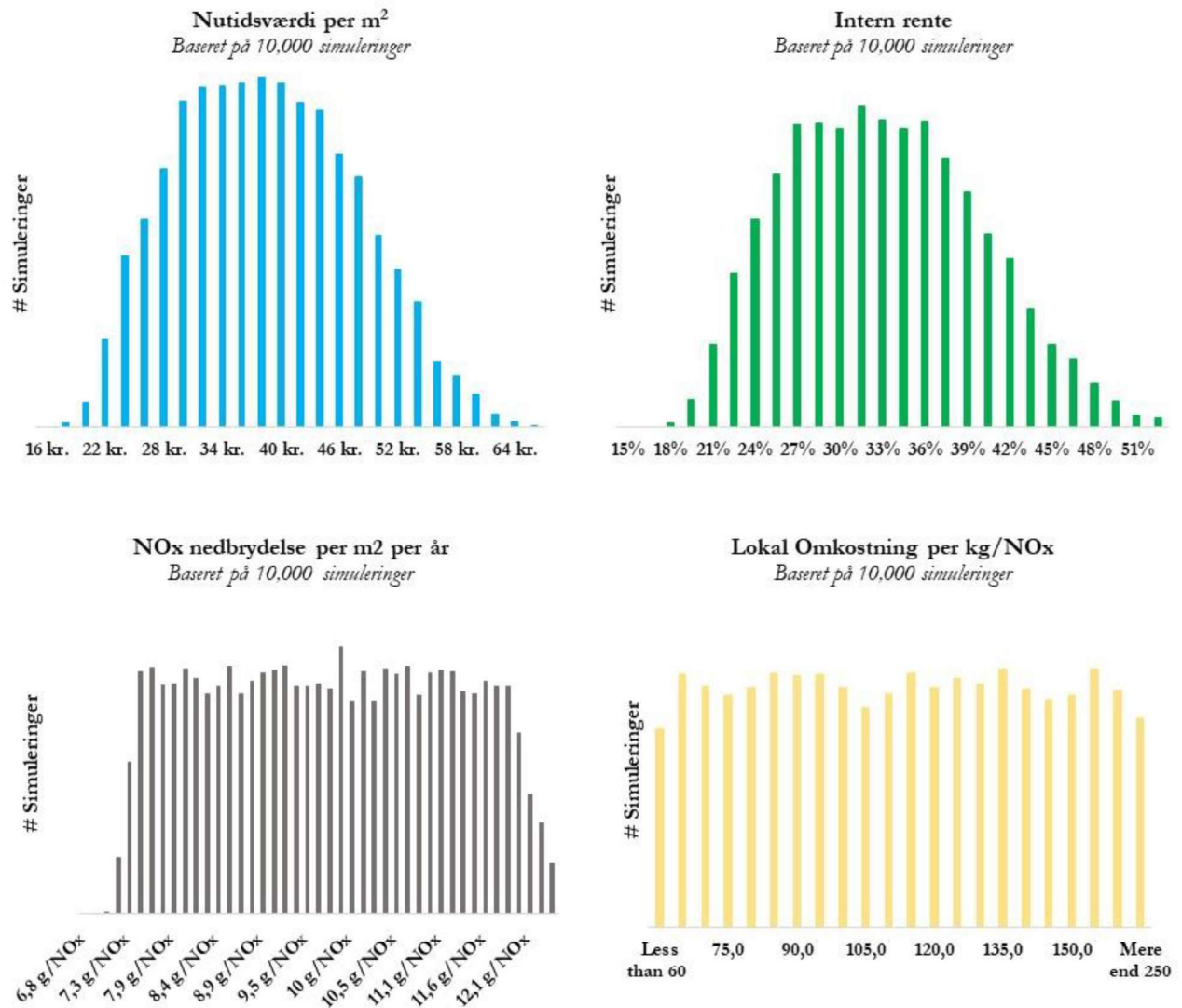
Vi antager at prisen per m² for NO_xOFF befinder sig på et niveau mellem DKK 9 og DKK 10, og prisen for applicering forventes at ligge på mellem DKK 0,7 og DKK 1,3. Prisen for NO_xOFF er normalt fordelt med flest simuleringer mellem DKK 10,4 og DKK 10,8.

7.2.4.4. Resultater for Bønnelyckes Plads og Skt. Peder-/ Skt. Ols Stræde

Simuleringerne viser en gennemsnitlig nedbrydelseffekt på 48,3 kg NO_x per år i 15 år. Den samfundsøkonomiske gevinst af nedbrydelsen af 1 kg NO_x er i gennemsnit DKK 301,5 per år for de regionale effekter og DKK 110 per år for de lokale effekter. Nutidsværdien per m² er henholdsvis DKK 38,9 og DKK 14,2 for de regionale og lokale effekter. Der er størst usikkerhed forbundet med de lokale effekter, i scenarierne worst- base- og best- case blev en fast sats på 164,4 kr. per kg/NO_x anvendt. Følsomhedsanalysen tager højde for risiko forbundet med overestimering hvilket indebærer en spredning i intervallet på mere end 100 kr. per kg/NO_x. Investeringsomkostningen forbundet med NO_xOFF er estimeret til i gennemsnit at ligge på DKK 15,6 hvilket betyder at teknologien i et totalt perspektiv er rentabel. Nutidsværdien efter omkostninger ligger i intervallet DKK 16,2 og DKK 65,1 når der tages højde for såvel de lokale og regionale effekter.

Den interne rente ligger i intervallet 16,7 % og 53 % med et gennemsnit på 32,3 %. Hvis man sammenligner disse tal med danske trafikale infrastrukturprojekter, er der tale om særdeles stærke resultater. Trafikale infrastrukturprojekter oplever som regel en intern rente i spændet 0,4 % til 13,5 % og vurderes som rentable, hvis de kan vise en intern rente på mere end 4 % (Vejdirektoratet, 2014).

Figur 47: Følsomhedsanalyse, sammendrag af væsentligste model output



Kilder: Udarbejdet af Photocat A/S

8. Konklusion

Roskilde Kommune ønsker gennem sin aktive miljøpolitik at anvende nye innovative tiltag inden for luftrensning. I dette projekt har Photocat sammen med Roskilde Kommune dokumenteret en ny løsning til at afhjælpe luftforurening i byrummet. Denne løsning baseres på fotokatalytisk teknologi, som kan anvendes til at reducere NO_x forureningen i byrummet.

Photocat har udviklet og kommercialiseret en fotokatalysator, som er beskrevet i denne rapport og er en samfundsøkonomisk god investering. Roskilde Kommune vil i et base scenarie kunne opnå en økonomisk gevinst på 3,7 kr. per m² lokalt og yderligere bidrage positivt med 33,1 kr. per m² regionalt og nationalt. Den interne rente for investeringen er udregnet til 32,7 %.

I projektet har Photocats NO_xOFF teknologi været afprøvet på to parkeringspladser på henholdsvis Bønnelyckes Plads og Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde. Det samlede areal på de to pladser er ca. 5.000 m² fordelt med ca. 1.200 m² på Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde og ca. 3.800 m² på Bønnelyckes Plads. Begge parkeringspladser har en overfladebelægning bestående af asfalt, som ikke er nylagt. Projektet er derfor udført som en levetidsforlængelse af de eksisterende overflader på Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde og Bønnelyckes Plads og dermed som en efterbehandling af den eksisterende belægning med NO_xOFF teknologien.

Der blev i projektet udviklet en optimeret fotokatalytisk behandling til asfaltbelægningen i Roskilde Kommune. Denne løsning blev testet i henhold til ISO 22197-1 standarden, og kapaciteten for NO_x fjernelsen blev bestemt. Derudover blev holdbarheden af løsningen testet ved hjælp af EN 1297:2004, og efter ca. 600 timer accelereret holdbarhedstest, svarende til to år i realtid, var NO_x aktiviteten stadig høj.

I projektet blev der også udviklet et specifikt in-situ set-up til at teste aktiviteten af den udviklede løsning over projektets varighed på tre år. Selve test-setup'et blev installeret i en varebil, for derved at kunne transportere det rundt til de to parkeringspladser. Ligeledes blev en måleprocedure udviklet til at bestemme aktiviteten som funktion af tiden.

Parkeringspladserne på henholdsvis Skt. Peder-/Skt. Ols Stræde og Bønnelyckes Plads blev appliceret i september 2014. Med den udviklede in-situ måling blev aktiviteten af parkeringspladserne målt løbende i projektperioden. Uptake koefficienten, γ , som er en enhedsløs størrelse, blev beregnet som funktion af tiden, hvormed stabiliteten af NO_xOFF behandlingen kunne sammenlignes. Målingerne har få usikkerheder pga. ujævnheder i vejen, som giver et større overfladeareal end beregnet og manuel påføring, som giver en inhomogen væskefordeling.

I denne rapport blev NO_x udbyttet fra parkeringspladserne bestemt. Det blev beregnet, at målingerne med løsningen på parkeringspladserne viser, at der fjernes $0,483 \frac{\text{g[NO]}}{\text{kWh}}$. Udbyttet er benævnt som funktion af solens effekt afsat på jorden i kWh. Det skyldes, at fotokatalyse drives med lys som energikilde, og solen er den drivende kraft bag NO_x reduktionen på parkeringspladserne. Det kan konkluderes, at anvendes en solindstråling på 563 kWh/m² per år med 5 % UV lys, er dette tilsvarende, at Roskilde kommune renser luften for 13,8 g NO_x/m² om året, hvilket omregnet udgør 69 kg for de behandlede parkeringsarealer om året.

I denne rapport blev den samfundsmæssige besparelse i et best-case scenarie over 15 år for de to parkeringspladser bestemt ved en NO_x fjernelse på 885,7 kg. Denne reduktion er blevet estimeret til at give en nutidsværdi for samfundet på 51 kr. per m². Den interne rente er vurderet til 44,9 %. Det kan på denne baggrund konkluderes, at den fotokatalytiske teknologi er et konkret og økonomisk rentabelt instrument til at rense luften i byrummet.

9. Referencer

(2016). Aarhus.

Aitken, R., Creely, K., & Tran, C. (2004). *Nanoparticles: An occupational hygiene review*. Edinburgh: HSE.

Ammann, M., Pöschl, U., & Rudich, Y. (2002). Effects of reversible adsorption and Langmuir-Hinshelwood surface reactions on gas uptake by atmospheric particles. *Physical Chemistry Chemical Physics*, s. 351-356.

Astrup, S. (2. 11 2016). Det cykler for København. *Politikken*. Hentet fra <http://politiken.dk/indland/kobenhavn/art5649047/Det-cykler-for-K%C3%B8benhavn>

Ballari, M. M., & Brouwers, H. J. (2013). Full scale demonstration of air-purifying pavement. *Journal of Hazardous Materials*, s. 406-414.

Barratt, B., Carslaw, D., & Green, D. (2010). High Holborn D-NOX Paint Trial - Report 3.

BBC News. (10. 12 2015). Volkswagen: The scandal explained. London, London, United Kingdom. Hentet fra <http://www.bbc.com/news/business-34324772>

Chinese Journal of Catalysis. (30. 08 2010). *Chinese Journal of Catalysis*. Hentet fra Chinese Journal of Catalysis: http://www.cjcat.org/CN/volumn/volumn_1344.shtml

Dalton, J. S., Janes, P. A., Jones, N. G., Nicholson, J. A., Hallam, K. R., & Allen, G. C. (2002). Photocatalytic oxidation of NO_x gases using TiO₂: A surface spectroscopic approach. *Environmental Pollution*, s. 415-422.

Danish Center for Environment and Energy. (2016). *Helbredseffekter og helbredsomkostninger fra emissionssektorer i Danmark*. Aarhus: Danish Center for Environment and Energy.

Danish Center for Environment and Energy. (2017). *Annual Danish Informative Inventory Report to UNECE*. Aarhus: Danish Center for Environment and Energy.

Danish Centre for Environment and Energy. (2014). *Partikelforurening og helbredseffekter i Roskilde Kommune*. Aarhus: Danish Centre for Environment and Energy.

Danmarks Nationalbank. (10. 07 2017). *Monetary Policy*. Hentet fra Danmarks Nationalbank: <http://www.nationalbanken.dk/en/monetarypolicy/Pages/default.aspx>

Danmarks Statistik. (05. 07 2017). *DST*. Hentet fra Danmarks Statistik: <http://www.dst.dk/da/Statistik/emner/befolkning-og-valg/doedsfald-og-middellevetid/doedsfald>

Dansk Statistik. (10. 07 2017). *Consumer Price Index*. Hentet fra Dansk Statistik: <http://www.dst.dk/en/Statistik/emner/priser-og-forbrug/forbrugerpriser/forbrugerprisindeks>

Den Europæiske Unions Tidende. (14. 12 2016). EUROPA-PARLAMENTETS OG RÅDETS DIREKTIV (EU) 2016/2284. *Den Europæiske Unions Tidende*, s. 31.

- Department for Environment, Food & Rural Affairs. (2015). *Valuing impacts on air quality: Updates in valuing changes in emissions of Oxides of Nitrogen (NO_x) and concentrations of Nitrogen Dioxide (NO₂)*. London: Department for Environment, Food & Rural Affairs.
- Det Økologiske Råd. (18. 02 2013). *ecocouncil*. Hentet fra <https://www.ecocouncil.dk/udgivelser/artikler/okonomi/2092-saetter-vi-pris-pa-fremtiden>
- Eriksen, P. (2007). *UV stråling og UV-indeks*. DMI.
- European Commission. (15. February 2017). Commission warns Germany, France, Spain, Italy and the United Kingdom of continued air pollution breaches. Brussels, Belgium. Hentet fra http://europa.eu/rapid/press-release_IP-17-238_en.htm
- European Environment Agency. (2016). *National Emission Ceilings Directive*. Copenhagen: European Environment Agency.
- European Environment Agency. (2017). *Air quality in Europe - 2017 report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Finansministeriet. (2017). *Vejledning i udarbejdelse af samfundsøkonomiske konsekvensvurderinger*. København: Finansministeriet.
- Finlayson-Pitts, B. J., & Pitts, J. N. (2000). *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*. Academic Press.
- Fujishima, A., & Honda, K. (7. July 1972). Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Journal of Nature*, s. 37-38.
- Fujishima, A., & Honda, K. (1972). Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature*, s. 37-38.
- Hüsken, G., Hunger, M., & Brouwers, H. J. (2009). Experimental study of photocatalytic concrete products for air purification. *Building and Environment*, s. 2463-2474.
- Ifang, S., Gallus, M., Liedtke, S., Kurtenbach, R., Wiesen, P., & Kleffmann, J. (2014). Standardization methods for testing photo-catalytic air remediation materials: Problems and solution. *Atmospheric Environment*, s. 154-161.
- Incentive. (2016). *Den trafikale infrastrukturens betydning for erhvervslivet*. Dansk Industri.
- Institut for miljøvidenskab. (31. 308 2017). *Institut for miljøvidenskab*. Hentet fra Aarhus Universitet: <http://envs.au.dk/videnudveksling/luft/emissioner/air-pollutants/nox/>
- JyskSolenergi. (2008). *Solindstråling i Danmark fra 2001 - 2008 (DMI)*. JyskSolenergi.
- Kameshima, J., & Takagi, T. (2010). *Report on Environmental Impact Assessment*. Tokyo: TOTO.

- Københavns Kommune, Teknik- og Miljøforvaltningen. (2010). *Flere går mere*. København: Københavns Kommune, Teknik- og Miljøforvaltningen. Hentet fra <http://www.fodtrafik.dk/kbh/Arkiv/7.pdf>
- Københavns Kommune, Teknik- og Miljøforvaltningen. (2011). *Trafikken i København, trafiktal 2006 - 2010*. København: Københavns Kommune.
- Laufs, S., Burgeth, G., Duttlinger, W., Kurtenbach, R., Maban, M., Thomas, C., . . . Kleffmann, J. (2010). Conversion of nitrogen oxides on commercial photocatalytic dispersion paints. *Atmospheric Environment*, s. 2341-2349.
- Laufs, S., Burgeth, G., Duttlinger, W., Kurtenbach, R., Maban, M., Thomas, C., . . . Kleffmann, J. (2010). Conversion of nitrogen oxides on commercial photocatalytic dispersion paints. *Atmospheric Environment*, s. 2341-2349.
- Manuel Jesús Gázquez, J. P.-T. (2014). A Review of the Production Cycle of. *Materials Sciences and Applications*, s. 441-458.
- Miljø- og Energiministeriet. (2000). *Samfundsøkonomisk vurdering af miljøprojekter*. København: Miljø- og Energiministeriet.
- Miljø- og Fødevarerministeriet. (21. 12 2011). Bekendtgørelse om vurdering og styring af luftkvaliteten. *MST-109-00027*, s. 66.
- Miljøministeriet, Miljøstyrelsen. (2015). *Luftkvalitetsplan for kvælstofdioxid (NO₂) i København*. København: Miljøstyrelsen. Hentet fra <http://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2015/03/978-87-93283-93-0.pdf>
- Ndour, M., D'Anna, B., George, C., Ka, O., Balkanski, Y., & Kleffmann, J. (2008). Photoenhanced uptake of NO₂ on mineral dust: Laboratory experiments and model simulations. *Geophysical Research Letters*, s. 1-5.
- Nilsson, H., & Häger, A. (2010). Utvärdering av försöket med plattor med fotokatalytisk titandioxid på Amiralsgatan i Malmö. *Miljöförvaltningen Utvärdering*.
- Pendlebury, D. (28. 09 2012). *HUFFPOST*. Hentet fra Huffingtonpost: http://www.huffingtonpost.com/david-pendlebury/nobel-prize-science_b_1924702.html
- Poulsen, S. L., Svec, O. M., & Folli, A. (2016). *Assessment of the air quality after the execution of the photocatalytic structures*. Teknologisk Institut.
- SCCNFP. (2000). *OPINION OF THE SCIENTIFIC COMMITTEE ON COSMETIC PRODUCTS AND NON-FOOD PRODUCTS INTENDED FOR CONSUMERS CONCERNING TITANIUM DIOXIDE*. SCCNFP.
- Semmler, K., & Proft, B. (2004). Titanium dioxide-based nano-particles and pigments: Fundamentals, properties and applications. *Sachtleben Chemie*.

SLB Analys. (28. 06 2017). *SLB*. Hentet fra <http://slb.nu/slbanalys/historiska-data-luft/>

SLB Analys Miljöförvaltningen i Stockholm. (2017). *Lufsten i Stockholm - Årsrapport*. Stockholm: SLB Analys, Miljöförvaltningen i Stockholm.

The Guardian. (13. 01 2017). Renault to be investigated over diesel emissions 'cheating'. London, London, United Kingdom. Hentet fra <https://www.theguardian.com/business/2017/jan/13/renault-diesel-emissions-cheating-france-us-fiat-chrysler>

The New York Times. (23. 05 2017). German Prosecutors Search Daimler Offices in Diesel Emissions Inquiry. New York, New York, United States of America. Hentet fra <https://www.nytimes.com/2017/05/23/business/daimler-diesel-emissions-germany.html>

The United Nations. (2016). *The UN report on Clean Air*. The United Nations. Hentet fra http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2016/AIR/Publications/CLRTAP_Scientific_Assessment_Report_-_Final_20-5-2016.pdf

Transportøkonomisk institutt: Stiftelsen Norsk senter for samferdselsforskning. (10 2014). *Marginale eksterne kostnader ved vegtrafikk*. Oslo: Finansdepartementet, Klima- og miljødepartementet og Samferdselsdepartementet.

Umweltbundesamt. (28. 06 2017). *UmweltBundesamt*. Hentet fra Current air data: https://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/aktuelle-luftdaten#/map?s=q1bKTSxQsqpWSs7PyS9SslIqM1TSUSpILcrMT1GyMjQDsnMSKzPz0p0Sk7PLE4uAgmmjOcWpOkolmbmpSlZ5pTk5tbUA&_k=qsj5ny

United Nations. (2016). *Clean Air for Life*. United Nations, Secretariat Convention on Long-range Transboundary Air Pollution.

United Nations. (2016). *Towards Cleaner Air, Scientific Assessment Report 2016*. Copenhagen: United Nations.

Vejdirektoratet. (2014). *Udbygning af den østjyske motorvej (E45)*. Vejdirektoratet.

World Health Organization. (31. 08 2017). *World Health Organization*. Hentet fra <http://www.who.int/ceh/risks/cehair/en/>

Zouzelka, R., & Rathousky, J. (2017). Photocatalytic abatement of NO_x pollutants in the air using commercial functional coating with porous morphology. *Applied Catalysis B: Environmental*, s. 466-476.