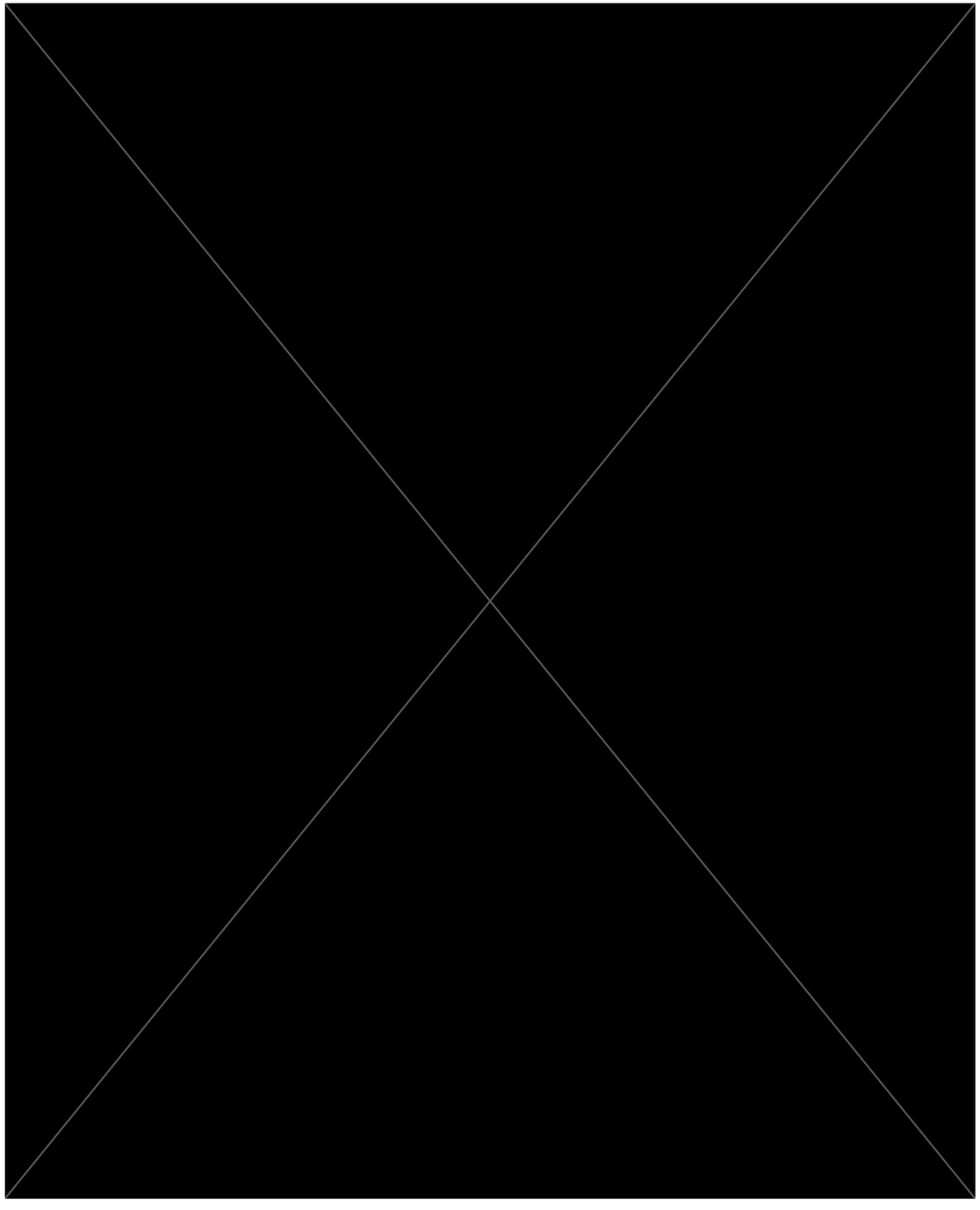


Partikelforurening fra levende lys i kirkerum

Resumé
Partikler fra levende lys formodes at kunne forårsage tilsmudsning af kalkmalerier. I en række testmålinger er det undersøgt, hvorvidt forskellig udformning af lys, eller forskellig vokstype, påvirker afgivelsen af ultrafine partikler. Generelt forårsager tykkere lys en lavere partikelkoncentration end tyndere lys, og ren stearin flere partikler end paraffin og bivoks. Lavest udledning gav palmestearin og vegetabilsk/palmeolielys. Sodningstests viste dog ikke fuldstændig overensstemmelse mellem partikelkoncentration og tilsodning af testplader, hvilket muligvis kan skyldes at ikke alle partikler er sod, men måske uforbrændte voks-aerosoler. For lys der brændte ujævnt var tilsodningen dog markant, uanset vokstype. Ved partikelmåling i to kirkerum, med 23-29 lys tændt, måltes partikelniveauer mellem 220.000-320.000 partikler/mL luft. Den fortsatte eksponering til partikler, som hang i luften efter lysene blev slukket, udgjorde 37% af den samlede dosis for en lys-episode. Denne andel kunne reduceres med luftfiltrering, eller mere effektivt med udluftning, til 18% af den samlede dosis. Yderligere forbedring kan opnås ved at benytte lys af andre brændselstyper end ren stearin, f.eks. vegetabilsk/palmeolie, eller selvfølgelig helt at undgå brugen af levende lys.

Keywords:
levende lys, sod, tilsmudsning, luftforurening, ultrafine partikler, præventiv konservering, kirker, kalkmaleri

TEKST AF

Anne Sophie Bonde Andreassen,

Bac.scient.cons, Nationalmuseet, Bevaring og Naturvidenskab, Kgs. Lyngby, Danmark
asb@natmus.dk

Morten Ryhl-Svendsen (kontakt)

Lektor, ph.d., Det Kongelige Danske Kunstakademis Skoler for Arkitektur, Design og Konservering (KADK), Konservatorskolen, København, Danmark
mrsv@kadk.dk

Indledning

Mange faktorer har indflydelse på kalkmaleriers bevaring. En væsentlig nedbrydningsmekanisme er tilsmudsning. Tilsmudsningen er ofte årsag til, at der igangsættes konservering eller restaurering af kirkers kalkmalerier, hvilket ofte er en bekostelig affære. Disse behandlinger kan desuden være særdeles vanskelige at udføre, da tilsmudsningen kan være svær at fjerne fra de porøse kalklag.
Tilsmudsning kan have flere årsager, men fælles for alle er, at partikler tilføres luften i kirkerummet, og vil ramme og deponeres på vægge og andre overflader, igennem luftens bevægelser i rummet. Dette kan ske via forskellige fysiske fænomener, som det vil føre for vidt at beskrive her; dog kan især termophoresis (eller termodiffusion) nævnes som en vigtig tilsmudsningsmekanisme. Ved dette fænomen sker en koncentreret deponering af partikler fra en varm luftstrøm, når denne rammer en kold overflade. Resultatet er kraftig, lokal tilsmudsning, som det ofte ses lige over radiatorer, eller over lamper opsat på kolde ydervægge. Se f.eks. Camuffo (2014: 283-346) og Phoenix & Burnstock (1990) for en uddybende gennemgang af fænomenet partikeldeponering.
Partikelforurening består, alt efter kilden, af partikler i forskellige størrelsesfraktioner. Her har især de "ultrafine" partikler konserveringsmæssig relevans. På grund af deres aerodynamiske egenskaber, og meget lille størrelse, er disse utroligt svære at afrense efter deponering, da de har en stor vedhængskraft, og kan trænge langt ind i porøse materialer (Phoenix & Burnstock 1990). Ultrafin partikelforurening er derfor potentielt meget skadelige for kalkmaleri såvel som for andre kulturarvsmaterialer. Grænsen mellem den "grove", "fine", og "ultrafine" størrelsesfraktion for partikler er ikke altid entydigt defineret, men generelt anses partikler med en diameter på under 1 µm som fine til ultrafine.
Historisk har brugen af brændeovne og kalorifere, der i nogle kirker blev anvendt til opvarmning helt op til

Tabel 1. Lys inddraget i undersøgelsen. Candles included in this study.

Nr.	Type	Voks	Fabrikat	Diameter (mm)
1	Kronelys	Ren stearin	Asp-Holmblad A/S, Danmark	23
2	Fyrfadslys	Ren stearin	Asp-Holmblad A/S, Danmark	27
3	Bloklys	Ren stearin	Asp-Holmblad A/S, Danmark	70
4	Kanallys	Ren stearin	Asp-Holmblad A/S, Danmark	25
5	Juletræslys	Ren stearin	Asp-Holmblad A/S, Danmark	12
6	Lys i glasbowle	Ren stearin	"No name" (købt i Brugsen, Danmark)	80-90
7	Kronelys	Paraffin	"No name" (købt i Søstrene Grene, Danmark)	22
8	Kronelys	Palmestearin	Bio-Kerzen, Tyskland	22
9	Kronelys	Bivoks	Candle Cavern, England	20
10	Kronelys	Ren stearin	Cherwell House , Diana Lys, Danmark	22
11	Kronelys	Ren stearin	Änglamark, Coop Danmark A/S	22
12	Håndstøbt, "gammeldags"	Fåretalg (tællelys)	"No name", middelaldermarked	17-20
13	Olielys	Vegetabilsk (palme) olie	Pure Candle, Fritz Schur Consumer Products A/S, Danmark	Ikke relevant, design som olielampe med væge i oliebeholder

1940'erne, været hovedårsag til tilsmudsningen af kirkens interiør. Andre, nutidige kilder er den partikelforurening, som findes i udemiljøet, og som trænger ind i kirken med den naturlige ventilation (Trampedach 2008; Grau-Bové & Strlic 2013). Her kan kilderne blandt andet være trafik, eller moderne brug af brændeovne i boliger i nabolaget. En anden væsentlig kilde til partikelforurening i kirkerum formodes at komme fra brugen af levende lys, der kan udlede en væsentlig mængde ultrafine partikler under afbrændingen. Disse partiklers sammensætning afhænger af lysets forbrændingsmønster, som overordnet kan inddeles i "normal" (stille, uforstyrret flamme med nær fuldstændig forbrænding), "sodende" (blafrende flamme der forårsager ufuldstændig forbrænding), og "ulmende" (glødende væge ved slukning). Ved fuldstændig forbrænding udleder lysets flamme primært uorganiske partikler (salte), hvor i mod en sodende forbrænding primært udleder uforbrændt kulstof ("sod"). Ved ulmende forbrænding fordampes voksaerosoler, hvilket giver en grå-hvid røg (Fine et al 1999; Pagels et al 2009).

Der er dog ikke megen litteratur, som belyser dette specifikke emne ud fra et bevaringsmæssigt fokus, herunder partiklernes potentiale for tilsmudsning (se dog Huynh et al 1991; Fine et al 1999). Størstedelen af faglitteraturen omkring forurening fra levende lys fokuserer på menneskelig komfort og helbred (f.eks. Afshari et al 2005; Pagels et al 2009; Zai et al 2006). Vi fandt det derfor interessant at undersøge, hvor stor partikelforureningen fra levende lys rent faktisk vil være, når disse benyttes i kirkerum. I langt de fleste danske kirker benyttes lys på alteret under de almindelige gudstjenester, og eventuelt suppleret med ekstra rækker af lys langs bænke, eller i lysekroner, ved særlige kirkelige handlinger. I en almindelig dansk middelalderkirke kan der derved sagtens være tændt op til 30-40 levende lys på én gang, under f.eks. et bryllup eller en begravelse.

Dette var udgangspunktet for et bachelorprojekt, udført af A.S. Bonde Andreassen, på Konservatorskolen i København, i foråret 2016. Formålet med projektet var, at undersøge forureningsniveauer og sodningseffekt for en række forskellige typer lys, samt undersøge hvorledes man med præventive tiltag, kan mindske eksponeringen til partikelforurening fra levende lys, hvis disse bruges i kulturarvsbygninger.

Undersøgelsen består af tre dele: Det blev først, i et testlokale, undersøgt hvorledes vokstype og udformning af lys havde indflydelse på partikelemissionen. Der blev derefter udført forsøg med tilsodning forårsaget af udvalgte lystyper fra første del. Endelig blev der foretaget undersøgelser i to danske landsbykirker, for at vise omfanget af partikelforurening fra brugen af levende lys i et typisk kirkerum, samt teste hvorledes man ved simple indgreb (udluftning, luftrensning) kan sænke den samlede partikeleksponering for kirkerummets interiør – herunder kalkmalerier.

Anvendelsen af levende lys under kirkelige handlinger er et følsomt emne, som mange har en mening om. Det er ikke vores ærinde, i denne artikel, uden videre at fraråde brugen af levende lys. Det er vores håb, at vi kan bidrage til debatten med faktiske data omkring levende lys' partikeludledning i kulturarvsmiljøer, og demonstrere hvorledes relativt simple indgreb kan mindske den samlede forureningsdosis i eksempelvis et kirkerum.

Materialer og metode

Test af vokstype og udformning

En række lys af forskellige udformning og vokstyper blev inddraget i undersøgelsen. For test af lysets udformnings indflydelse på partikeludledningen, valgtes et såkaldt kronelys, fyrfadslys, bloklys, kanallys (kronelys med fire åbne kanaler ned igennem lyset til stearinafløb), juletræslys, samt et lys i glasbowle. Disse var alle i ægte stearin, og på nær glas-lyset af ens fabrikat (se Tabel 1, nr. 1-6, for detaljer). Der blev så vidt muligt udvalgt stearinlys af samme fabrikat for at opnå en formodet ensartethed i voks, og derved kun forskel i lysets udformning og evt. væge (Tabel 1, nr. 1-5). Men det skal understreges, at undersøgelsen ikke skal opfattes som en test af det udvalgte fabrikat. Produkterne blev udvalgt som typiske repræsentanter for stearinlys på markedet, og en test af andre mærker ville sandsynligvis give tilsvarende resultater. For at understrege dette, blev to andre kronelys, i samme størrelse og af ren stearin, men af to andre fabrikater, ligeledes testet (Tabel 1, nr. 10-11).

Til test af forskellige vokstyper, blev kronelyset i ren stearin udvalgt som undersøgelsens "typelys", som de andre lys testes op i mod. Kronelys har samme diameter fra top til bund, og der var muligt at finde kronelys i stearin (det samme som for udformningstesten), paraffin, bivoks, og palmestearin, med næsten ens diameter (Tabel 1, nr. 1, 7-9). Endvidere blev et gammeldags tællelys afprøvet, dette var håndstøbt og derved mere ujævnt formet end de moderne støbte lys (Tabel 1, nr. 12). Endelig blev et olielys, bestående af en flydende vegetabilsk olie i en engangsbeholder med væge, udformet som et bloklys, testet (Tabel 1, nr. 13).

I denne testserie blev partikeludledningen fra en række forskellige lystyper målt, som den koncentration (antal ultrafine partikler per mL luft) der blev opbygget i indeluften under en 2-timers lysafbrænding. Testen blev udført ved at placere et lys og en partikelmåler symmetrisk over for hinanden, med ca. 2 m afstand, i et 34 m2 testlokale (2,6 m højde). Testlokalet var et uforstyrret rum uden mekanisk ventilation, med klinkegulv, malet murværk, og gipsloft. Lokalet var reguleret til et almindelig komfortklima, omkring 22-24 °C, og med en naturlig indstillet stabil, moderat relativ luftfugtighed (<50% RF). Lokalets naturlige luftskifte var ca. 0,5 rumvolumen per time, bestemt ud fra hastigheden hvorved CO_2, benyttet som sporgas, blev bortventileret (CO_2 fra gasflaske + Tinytag CO_2 Logger, Gemini Dataloggers Ltd., Chichester, UK).

Partikelmåleren (TSI P-Trak Ultrafine Particle Counter 8525, TSI Inc., Shoreview MN, USA) registrerede koncentrationen af aerosoler og partikler i luften, i området 0,02 - 1 µm, med 1 minuts intervaller. Instrumentet suger kontinuerligt en luftprøve igennem et tågekammer, hvori partiklerne kondenseres og detekteres (tælles) optisk. Metoden kan ikke analysere partiklernes kemiske sammensætning.

For hver test måltes først lokalets baggrundskoncentration i 30 min, hvorefter et lys blev tændt med en gaslighter. Herefter blev lokalet forladt, således at lyset kunne brænde uforstyrret med et minimum af luftbevægelse omkring det. Luftbevægelser blev for alle tests målt ved enkelte spotmålinger, i området mellem lys og partikelmåler (SwemaAir 30 Anemometer, Swema, Stockholm), og var i størrelsesordenen 0,00-0,02 m/s.

Hvert lys (bortset fra juletræslyset der brændte op før tid) brændte i mere end to timer. Partikeltællerens målinger blev registreret i instrumentets datalogger hvert minut, og databehandling (f.eks. gennemsnitskoncentration) for den første 2-timers periode blev efterfølgende udført i Excel-regneark.

Ved en enkelt test blev partikelkoncentrationen målt for et lys påvirket af luftbevægelser, der fik flammen til brænde ujævnt. Dette blev udført ved at placere en almindelig bordventilator 3 m fra lyset, indstillet til at blæse ved lav hastighed mens propellen drejede fra side til side. Dette forårsagede luftbevægelser nær lyset i intervallet 0,1 - 0,6 m/s, og en skiftevis stille og tydeligt blafrende flamme. Den høje lufthastighed var tydeligt mærkbar, og kan sammenlignes med træk fra et åbenstående vindue.



Figur 1. Det bemalede hvælv i Lynge Kirkes kor. De hvide felter er renseprøver foretaget af Nationalmuseets konservatorer, som forundersøgelse inden eventuel afrensning. Foto: forfatterne.
Wall paintings in the chancel of Lynge Church. The white areas are cleaning tests carried out by the conservators of the National Museum of Denmark, in a pre-investigation before cleaning may be decided on. Photo: the authors.



Figur 2: Renseprøve, der foretages i 2015 af Nationalmuseet konservatorer, viser tydelig graden af tilsmudsning i korets hvælv. Foto: Ida Haslund, Nationalmuseet.
A cleaning test carried out in 2015 by the National Museum's conservators, clearly shows the degree of soiling of the chancel vault. Photo: Ida Haslund, National Museum of Denmark.

Sodtest
Et lys blev anbragt i en lysestage, og 15 cm over lysets brændpunkt blev en hvidkalket flise med målene 10 x 10 cm placeret vandret, således, at den kalkede flade vendte ned mod lyset. Disse blev fremstillet ved at hvidte en brændt teglflise tre gange med kalkmælk fra kulekalk. Dernæst blev lyset tændt, og det brændte i 8 timer eller indtil, at der var 10 mm (±5 mm) tilbage af lyset. Efter 4 timer blev afstanden mellem lys og flise justeret, så der igen var 15 cm mellem brændpunktet på lyset og flisen. Efterfølgende blev alle fliser visuelt undersøgt, og der blev fortaget farvemåling (CIELAB farverum) på tre steder nær flisens midte (Minolta Spectrophotometer CM-2600d, Minolta Co., Ltd., Osaka, Japan). Ovennævnte test er inspireret den standardiserede europæiske sodtest for levende lys (EN 15426:2007). Ved denne test benyttes glasplader, hvor vi benyttede hvide fliser. Tilsodningen af glasset måles optisk, som glaspladens ændrede densitet. Af grunde, som kort beskrives under Resultater, valgte vi at afvige fra EN standarden.

Måling af partikelforurening i to kirkerum
Der blev foretaget feltmålinger i to kirkerum, hvor man benytter levende lys under de kirkelige handlinger. De valgte steder var Lynge Kirke og Uggeløse Kirke, der tilsammen udgør et dobbeltsogn nær Allerød i Nordsjælland, Danmark (www.lyug.dk). Begge kirkebygninger er typiske danske middelalderkirker, der stammer fra 1100-tallet, med ombygning til den nuværende udformning omkring 1300-tallet, og med yderligere til- og ombygninger som er kommet til senere. Korets hvælvede lofter er i Lynge Kirke rigt udsmykket med kalkmalerier, udført af Isefjordsmesteren omkring 1470. Disse blev senest renset og restaureret i 1961, og er i dag tydeligt tilsmudsede. Menighedsrådet overvejer derfor nu en ny afrensning (se, Figur 1-2). .
Kirkerummet i Uggeløse Kirke har et rumfang på ca. 600 m^3, mens Lynge Kirke er lidt større med ca. 800 m3. I begge kirker tændes to store bloklys i ren stearin på alteret ved almindelige gudstjenester. Tidligere har også en syv-armet lysestage været benyttet på alteret, med kanallys. Ved særlige lejligheder, eksempelvis begravelser, tændes endvidere lys langs bænkene ned igennem kirkeskibet (Figur 3-4).
I Lynge er der plads til 23 bænklys, og i Uggeløse 29 bænklys. I begge kirker benyttes kanallys i ren stearin.
I Lynge Kirke blev to TSI P-Trak partikelmålere opstillet henholdsvis midt for alteret i koret, samt en tredjedel inde i skibet. I Uggeløse Kirke blev én partikelmåler opstillet centralt i kirkerummet. Målehøjden var alle steder omtrent midt i rummet (2-3 meter over gulv). I begge kirker blev der foretaget to måleserier; først blev der tændt lys i et tidsrum på 1,5 time, hvilket svarer til typisk brug, og herefter blev lysene slukket. I første måleserie blev partikelniveauet i kirken derefter fortsat monitoreret, som det aftog mens kirkerummet stod aflukket og ubrugt hen.
I anden måleserie blev kirken udluftet med gennemtræk i ca. 1,5 time umiddelbart efter lysene var slukket.
I Uggeløse Kirke blev der endvidere foretaget en tredje måleserie, hvor en luftrenser med partikelfilter i HEPA-klasse ("High-Efficiency Particulate Arresting") blev anvendt i 3,5 time umiddelbart efter lysene blev slukket. Luftrenseren bestod af en mobil enhed hvor filter og ventilator er samlet i en kassette på hjul (QAir GCX Series med HEPA partikelfilter, Goldach, Schweiz), og som kan placeres midt i et lokale hvor den kontinuert cirkulerer rumluften igennem filteret (Figur 5). I Uggeløse Kirke havde luftrenseren, ved fuld hastighed, kapacitet til at behandle ca. 0,7 rumvolumen per time. Måleserierne blev udført i april og maj måned, hvor indeklimaet i begge kirkerum lå omkring 15-18° C og 40-50% RF. Endvidere blev en pilotmåling foretaget i Lynge Kirke i september måned året før. Kirkerummenes naturlige luftskifte blev målt ved CO_2-koncentrationshenfald, som tidligere beskrevet. For Lynge Kirke var dette omkring 0,3 rumvolumen per time, og for Uggeløse Kirke ca. 0,5. Ved udluftning, hvor to døre i hver kirkebygning blev åbnet helt op således at der blev skabt gennemtræk, øgedes luftskiftet begge steder 10-13 gange.
Endelig blev der i Lyngekirke ophængt en hvidkalket teglflise (samme som beskrevet for sodtest) i 2 m højde på bagvæggen i koret, i en periode på et år (maj 2016 – maj 2017).



Figur 5. Luftrenser opstillet i Uggeløse Kirke. Foto: forfatterne.
Air cleaner in Uggeløse Church. Photo: the authors.



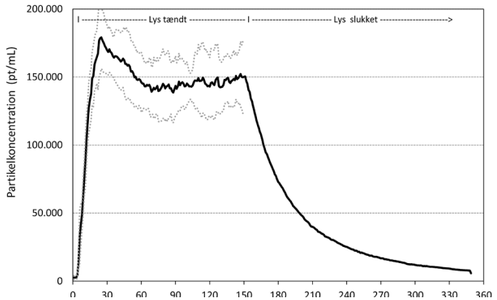
Figur 3.Lynge Kirke, med lys tændt på alter og langs bænke. Foto: forfatterne.
Lynge Church with candles lit on the altar and along the pews. Photo: the authors.



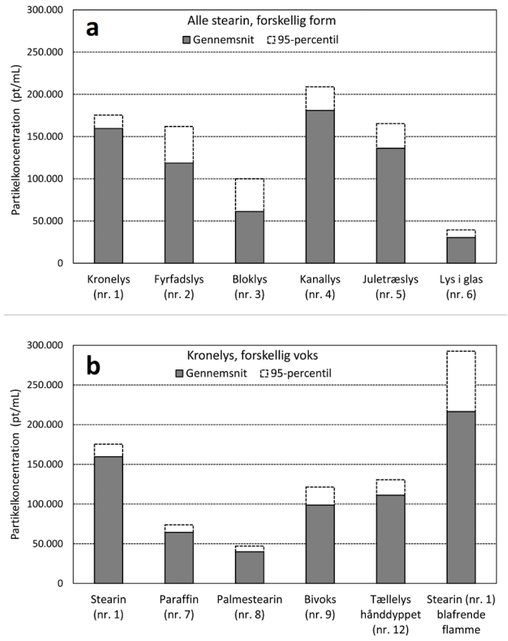
Figur 4.Bloklys på alteret i Lynge Kirke slukkes efter partikelmåling. Foto: forfatterne.
Pillar candles on the altar in Lynge Church being extinguished after particle measurement. Photo: the authors.

Resultater

Vokstype og udformning
Formålet med første del af forsøgsrækken var at kortlægge, hvor stor en mængde ultrafine partikler levende lys udleder under afbrænding. I Figur 6 ses hvorledes forsøgets 'typelys', et kronelys i ren stearin fra Asp-Holmblad (nr. 1, Tabel 1), påvirker koncentrationen af ultrafine partikler i testlokalet under afbrænding. Baggrundskoncentrationen ligger på få tusind partikler per mL luft (pt/mL), men stiger inden for få minutter efter lyset tændes til et kortvarigt maksimum, hvorefter koncentrationen aftager lidt mod et jævnt niveau omkring 150.000 pt/mL (gennemsnittet over to timers brændetid er ca. 160.000 pt/mL, se også Figur 7a). Det er vores erfaring, at de fabriksfremstillede lys brænder ensartet fra test til test. Partikelprofilen i Figur 6 er baseret på seks gentagne tests af samme type kronelys, og viser gen-



Figur 6. Partikelkoncentrationen i testlokale ved afbrænding af et stearin kronelys. Kurven viser gennemsnitkoncentration for seks tests. Plus-minus en standardafvigelse for målingerne igennem de seks tests er markeret med stiplede linjer. Kurven fortsætter med en markering af hvorledes koncentrationen henfalder efter et lys er slukket. Henfaldet er tilnærmelsesvist eksponentielt aftagende.
The particle concentration in the test room during the burning of one stearin wax dinner candle. The curve represent the mean concentration of six tests. Plus-minus one standard deviation of the measurements through-out the six tests are marked with dotted lines. The curve continues into showing how the concentration decays over time after a candle was extinguished. The concentration decay is approximately exponentially decreasing.

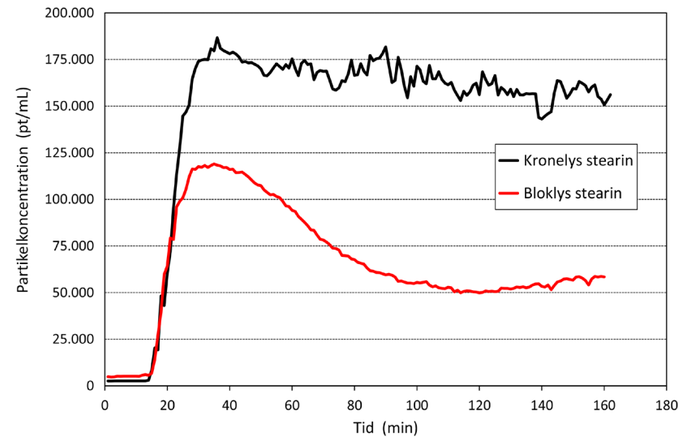


Figur 7. Øverst (7a) ses gennemsnits-partikelkoncentrationen for de to første timers brændetid af seks forskellige lys af forskellig form, alle i ren stearin. Juletræslyset brændte dog ud efter ca. 1,5 time. Nederst (7b) ses samme for tests af ensformede lys (kronelys) men i forskellig type voks, eller under forskellig luftpåvirkning. Tællelyset har dog kun en tilnærmet samme udformning. Omfanget af variation i partikelniveauet under testene antydes af 95-percentilen for hver måleserie. Nummereringen henviser til beskrivelserne i Tabel 1.
At the top (7a) is shown the average particle concentration for the first two hours of burning of six different candles of different shapes, all in pure stearin wax. The Christmas tree candle, however, burned out after about 1.5 hours. At the bottom (7b) is shown the same for set of tests of identically shaped candles (dinner candles) but of different types of wax, or under different air velocity conditions. The tallow candle was, however, of a slightly different design. The extent of variation in particle levels during the tests is indicated by the 95th percentile for each series of measurements. The numbering refers to the descriptions in Table 1.

nemsnitskoncentrationen ±1 standard-afvigelse, som var i størrelsesordenen ±20.000 pt/mL (eller ca. ±13 %).
Testen viste endvidere hvorledes koncentrationshenfaldet, efter lyset slukkes, er tilnærmelsesvist eksponentielt aftagende. Dette indikerer, at partikelniveauet i luften faldt ved en konstant rate; dette sker via ventilation samt deponering på interiørets overflader.
I den aktuelle testsituation tager det over fire timer fra lyset slukkes, til partikelkoncentrationen igen når ned på baggrundsniveauet.
For at afprøve, hvorvidt det valgte 'typelys' reelt var typisk, blev to tilsvarende stearin-kronelys af andre producenter testet under samme forhold (nr. 10-11, Tabel 1). Disse viste et fuldstændigt ens brændselsmønster, og med et tilsvarende partikelniveau i testlokalet, der varierede mindre end 9 % fra lys nr. 1.
Undersøgelsen viste endvidere en væsentlig forskel i den partikelkoncentration, som levende lys af forskellig udformning eller vokstype forårsagede. De i Figur 7a viste resultater stammer alle fra tests af lys i ren stearin, men med forskellig udformning. Kanallyset, som i øvrigt er en meget anvendt lystype i mange danske kirker, viser den højeste partikelkoncentration med et 2-timers gennemsnit på over 180.000 pt/mL. Dernæst ligger det almindelige kronelys på ca. 160.000 pt/mL, og i bunden ligger lys i glas med et gennemsnit på ca. 30.000 pt/mL og bloklys på omtrent 61.000 pt/mL.

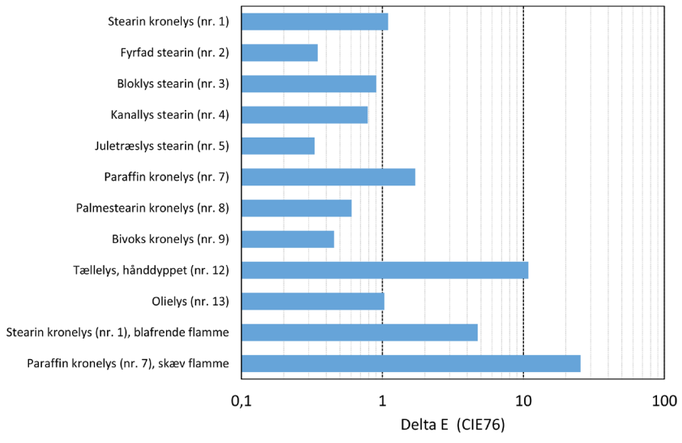
Hvorfor lys med større diameter, som glaslys, bloklys, og til dels fyrfadslys, forårsager en lavere partikelkoncentration end de tyndere lys, kan denne forsøgsrække ikke afdække, men vi spekulerer på om det kan have en sammenhæng med, at der under afbrændingen af disse tykkere lys ophobes en "pøl" af smeltet stearin, og at denne forvarmede, smeltede voks forbrænder renere end koligere, fast stearin. Faktisk har de tykke og de tynde lys en

væsentlig forskel i brændselsmønster, som de rapporterede 2-timers gennemsnit ikke umiddelbart afslører. Mens de tynde kronelys hurtigt giver en relativ ensartet partikelkoncentration under afbrænding, går partikelkoncentrationen for de tykkere lys fra hurtigt at nå et maksimum, til cirka en halvering af samme indenfor den første times brændetid (Figur 8). Vægens egenskaber kan også formodes at have indflydelse på både brændselsrate og partikeldannelse (Willhöft & Horn 2000), men dette aspekt er ikke undersøgt nærmere i vores testrække.
Derimod observeres en tydelig forskel i de forskellige vokstypers indflydelse på partikelkoncentrationen (Figur 7b). Her ses, at palmestearin og paraffin forårsager de laveste partikelkoncentrationer på henholdsvis ca. 40.000 og 64.000 pt/mL, mens ren stearin, med de ca. 160.000 pt/mL, gav en omtrent fire gange højere koncentration end palmestearinen. Imellem disse lå bivoks, og - måske lidt overraskende - tællelyset, med henholdsvis 99.000 og 111.000 pt/mL.
For både form- og vokstypetest, foregik målingerne under så uforstyrrede forhold som muligt, hvor luftbevægelserne omkring lyset var ca. 0,00- 0,02 m/s. En test af typelyset, kronelys i ren stearin, under luftbevægelser, der forårsagede en blafrende flamme, resulterede i en 2-timers gennemsnitskoncentration på 216.000 pt/mL. Brændselsmønsteret var endvidere meget ujævnt, med korttidspeak-værdier i koncentration op over 290.000 pt/mL.



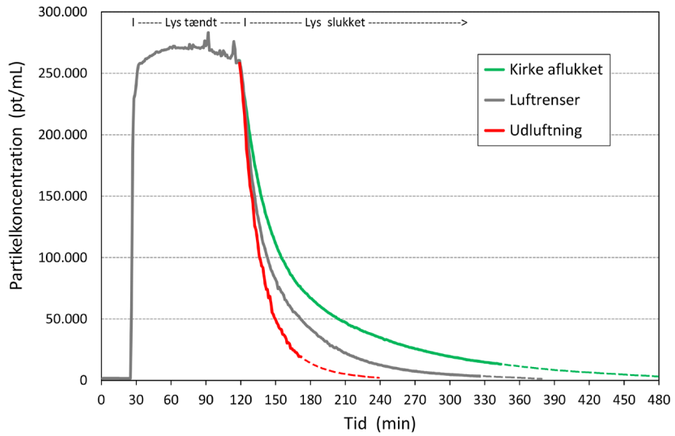
Figur 8. Sammenlignende graf af forløbet for partikelpåvirkningen i testrum, fra afbrænding af et bloklys og et kronelys, begge i ren stearin.
Comparison of the development in the particle level inside the test room, from the burning of a pillar candle and a dinner candle, both in pure stearin wax.

Sodtest
Indledende sodtests udført efter EN 15426:2007 var svære at vurdere. I flere tilfælde kunne en hvidlig tilsmudsning anes på test-glaspladen, som lysets flamme var placeret under, men i udmålingen passerede lyset alligevel te-



Figur 9. Farveændring af hvidkalkede fliser efter sodtest, som udtrykt i Delta E (beregnet ud fra CIE76 L*a*b* koordinater). Den primære ændring var i lyshed (delta L*) fra hvid mod grå/sort. Bemærk log-skala.
*The color change of whitewashed tiles after sooting behavior tests, as expressed in Delta E (calculated using the CIE76 L*a*b* coordinates). The main change was in lightness (delta L*) going from white to gray/black. Please note log scale.*

sten. Vi tilskriver dette, at testmetoden er beregnet til almindelige boligsituationer, og ikke definere tolerancer og krav, man intuitivt stiller ved bevaring af kulturarv.
Den hvidlige tilsmudsning kunne tyde på, at ikke-forbrændte aerosoler fra lysets voks kondenserer tilbage på overflader. I modsætning til dette vil rigtig sod; primært kulstofrester fra forbrændt materiale, give en sortsværtning. Dette er i tråd med observationer gjort af Fine et al 1999, og Pagels et al 2009. For bedre at kunne relatere denne deponering af hvidlige eller sorte partikler til kalkmaleri, besluttede vi at benytte en et opsamlingsmateriale, der illuderer en kirkevæg, nemlig en hvidkalket teglflise.
Ved farvemåling af alle lysenes sværtning af fliserne bevægede farveændringen sig primært fra hvid mod sort (prøven blev mere grå). Den samlede farveændring udtrykt i Delta E (CIE76, E*ab) var for alle moderne lys, der brændte under rolige og uforstyrrede forhold, mindre end 2 (Figur 9). Dette er cirka grænsen for en farveændring, der visuelt kan opfattes. Både kronelys i bivoks og palmestearin lå langt lavere, med Delta E på henholdsvis 0,5 og 0,6. Fyrfadslys og juletræslys i ren stearin lå også begge meget lavt (Delta E < 0,4), hvilket kan skyldes lysenes fysiske udformning, som blandt andet medfører en mindre flamme.
Kronelyset i paraffin gav en Delta E værdi lige under 2, hvilket er højt i forhold til den lave partikelkoncentration samme lys viste ved partikeltesten, men dog stadig kun lige nær en synlig tilsodning. Stadig kan dette antyde vigtigheden i, at forholde sig til partikeltype, og ikke kun partikelantal, ved vurdering af en forureningskilde. Kun tællelyset forårsagede en meget tydelig sortsværtning (Delta E = 11). Dette står i stærk kontrast til koncentrationsmålingen, hvor tællelyset forårsagede en relativ lav partikelkoncentration, der ikke var meget afvigende fra det ikke-sodende bivokslys. Ligeledes forårsagede et stearin kronelys med blafrende flamme en tydelig tilsodning (Delta E = 5), og et paraffinlys der utilsigtet stod skævt og derved brændte ujævnt gav en meget sort afsvedning af flisen (Delta E = 26), se Figur 9. Dette viser, at måden hvorpå lyset brænder også har en betydelig effekt på mængden og sodningsevnen af de partikler, der udledes, jfr. de tre forbrændingsmønstre beskrevet tidligere (Fine et al 1999; Pagels et al 2009).
På den hvidkalkede teglflise ophængt i Lynge Kirke måltes efter et år en Delta E ændring på 0,9, hvilket er en målbar farveændring, men på et niveau under hvad der kan opfattes visuelt.



Figur 10. Episode med 1,5 times tændte lys i Uggeløse Kirke, efterfulgt af luftrensning med HEPA filterenhed. Til sammenligning er partikelhenfaldskurver for test med udluftning, og test med aflukket kirkerum lagt oveni grafen. Henfald efter målinger blev afsluttet, og indtil baggrundsniveau blev nået, er estimeret som en eksponentielt faldende rate, og markeret med stiplet linje.
Episode with candles lit for 1.5 hour in Uggeløse Church, followed by air cleaning using a HEPA filter unit. For comparison, the particle-concentration decay curves for a test during a drafty venting and for a closed and undisturbed church are overlaid the graph. The continuation of the decay curves after the time of the ending of the measurements, and to the time when the background level would be reached, was presumed to follow an exponentially decreasing rate, and is marked as such with dashed lines.

Partikelforurening målt i to kirkerum

I begge kirker blev der foretaget gentagne målinger med stearinlys tændt, som under større kirkelige handlinger, hvilket vil sige, at lys på alter samt langs bænkene var tændt i 1,5 time. I Lynge Kirke indstillede partikelkoncentrationen sig hurtigt stabilt i omkring 220.000 – 250.000 pt/mL nær alteret i kirkens kor, og 250.000 – 300.000 pt/mL ude midt i kirkens skib. I Uggeløse kirke blev der midt i kirken nået et partikelniveau mellem 260.000 – 320.000 pt/mL (se eksempel på en måleserie i Figur 10). I begge kirkerum blev det høje stabile partikelniveau nået indenfor ca. 10 min.
Med respekt for den variation, der kan være i partikelniveau fra gang til gang, blandt andet grundet forskelle i vind og vejrs påvirkning af bygningens luftskifte, er den samlede partikeldosis i hver kirke ca. 400.000 partikel-timer (koncentration x tid), for den halvanden time, som lysene var tændt. Derimod var der en væsentlig forskel i den tid det tog for partikelforureningen at forsvinde fra indeluften, efter lysene blev slukket, alt efter om kirkerummet stod aflukket, eller blev luftet ud. For begge kirker tog det over 7 timer, fra lysene blev slukket og til partikelkoncentrationen igen havde nået ned til baggrundsniveauet, hvilket typisk lå mellem 2000-2500 pt/mL, når kirkerummet blot var lukket af og forladt uforstyrret (se Figur 10 for Uggeløse Kirke). Kirkerne er udelukkende ventileret via det naturlige luftskifte, som i måleperioden lå omkring 0,3-0,5 per time. For begge kirker udgjorde den ekstra partikeldosis, som kirkerummet og dets interiør blev eksponeret for i timerne efter lysene var slukket, og indtil partikelforureningen var ventileret væk, ca. 37% af den samlede dosis for hele lys-episoden. Dette procentvise forhold afhænger naturligvis helt af hvor længe lysene brænder, og den reelle belastning kan derfor være svær at vurdere alene ud fra det relative forhold. Men udtrykt i absolut dosis svarer den eksponering, der er opnået i tiden efter lysene var slukket, til den partikeludledning brændende lys ville udlede på ca. 53 minutter.
Raten hvorved partikelforureningen luftes væk, afhænger dog i stor grad af hvorledes udeklimaet påvirker kirkerummets luftskifte, hvilket derved også vil variere partikeldosis fra gang til gang. Ved en pilotmåling i Lynge kirke, et halvt år tidligere, observerede vi en lys-episode hvor partikelkoncentrationen først nåede tilbage til baggrundsniveauet efter 15 timer. I dette tilfælde udgjorde tiden efter at lysene var slukket, knap halvdelen af episodens samlede partikeldosis.
Når kirkerummene blev udluftet ved gennemtræk, efter de 1,5 times lysafbrænding, varede det ca. 2 timer inden partikelniveauet nåede baggrundskoncentrationen igen. Denne partikeldosis, i perioden efter lysene var slukket, udgjorde i begge kirker ca. 18% af den samlede eksponering for hele lys-episoden. Dette svarer i absolut dosis til den partikeludledning brændende lys ville udlede i ca. 20 minutter.
Da udluftning kan være problematisk for kalkmalerier og inventar i kirken, grundet faren for at forstyrre fugtbalancen i kirkerummet (og eksempelvis skabe udtørring når udeluften er meget kold), afprøvede vi i Uggeløse Kirke også luftrensning ved intern luftfiltrering. Den benyttede luftrenser kunne behandle ca. 0,7 rumvolumen luft per time. Dette er noget mindre end det ekstra luftskifte som en rigtig udluftning formåede, dog mere end fordoblede det stadigvæk kirkens samlede 'renluftsrate' i forhold til det naturlige luftskifte. Luftrenseren kørte i 3,5 time, hvorved koncentrationen faldt til 3500 pt/mL. Herved var baggrundsniveauet ikke nået helt, men vi estimerer, ved at formode en eksponentiel henfaldsrate for partikelkoncentrationen, at dette ville have taget i alt ca. 4,3 timer. Dette svarer i absolut dosis til den partikeludledning brændende lys ville udlede på ca. 33 minutter.

Olielys

Ved almindelig informationssøgning om levende lys og deres partikeludledning, fandt vi på Internettet flere omtaler af olielys som et mindre sodende alternativ til lys i fast voks. Blandt andet er olielys i enkelte tilfælde benyttet som erstatning for bloklys i ren stearin i danske kirker (se eksempelvis Nordjyske.dk, 2016). Selvom denne type lys afviger i både form og brændsel, fra de traditionelle lystyper vi har testet, inddrog vi for aktualitetens skyld også en test af et olielys. Lyset er baseret på vegetabilsk (palme) olie, og specielt beregnet til indendørsbrug. Som for vores 'typelys' i ren stearin skal det understreges, at undersøgelsen ikke skal opfattes som en særlig test af det udvalgte fabrikat. Olielyset blev udvalgt som en typisk repræsentant for denne type lys, og andre lignende produkter kan findes på markedet.
Ved en koncentrationsmåling i testlokalet forårsagede olielyset en 2-timers gennemsnitskoncentration på kun 8400 pt/mL, hvilket skal ses i forhold til typelyset i ren stearins, der udledte ca. 160.000 pt/mL under samme forhold. Herefter blev olielyset testet i Lynge Kirke, ved en måling af partikelniveauet i kirkens kor, forårsaget af to olielys placeret på alteret. Dette blev efterfølgende sammenholdt med partikelniveauet forårsaget af de to traditionelle alterbloklys i ren stearin, som normalt er opstillet samme sted. Her udledte de to olielys, over 1,5 time, en gennemsnitskoncentration på kun 4700 pt/mL. Dette skal ses i forhold til de to bloklys i ren stearin, som under samme forhold forårsagede en gennemsnitskoncentration på 131.000 pt/mL.

Diskussion

De sammenlignende tests af lys i forskellige vokstyper viser klart, at man kan opnå en nedsat partikeludledning ved at vælge palmestearin eller paraffin frem for ren stearin. For kronelys forårsagede palmestearinen en gennemsnitskoncentration på kun 25% af den rene stearin. Vi har ikke forfulgt årsagerne til disse variationer, men formoder, at de skyldes kombinationer af forskelle i væger, voks smeltepunkt, brændselsrate, og lignende. Hvad der derimod er mere relevant, ud fra et konserveringsmæssigt synspunkt, er hvorvidt partiklerne fra en type lys soder mere end

partikler fra et andet. Dette har vi ikke kunne graduere med den eksisterende standard for sodtest (EN 15426:2007), og kun groft med vores tillempede udgave med de hvidkalkede fliser. Den eneste markante forskel (Delta E > 2), der kunne observeres for de moderne lystyper er, at en blafrende eller skævt brændende flamme forårsager en betydelig sodsværtning. Dette er i sig selv en vigtig information, da tændte lys i et kirkerum med menneskelig aktivitet, og/eller let træk, formodentlig vil blafre det meste af tiden, og derved øge sodningen. Det historisk udformede tællelys forårsagede ligeledes en væsentlig tilsodning, hvilket kunne skyldes at talgen forbrænder mere ufuldstændigt, og måske også indeholder flere urenheder, end moderne voks.
I både EN standardtesten, og vores tillempede version, bliver den partikelmodtagne plade temmelig varm, idet den er placeret tæt over lysets flamme. En spotmåling med en infrarød temperaturmåler viste op til 180 °C på en hvid flise over et kronelys i ren stearin. Vi spekulerer på, hvorvidt dette giver et realistisk billede af "real-life" tilsodning, og om ikke den langvarige opvarmning faktisk kan brænde pladen ren for voksdeponeringer undervejs i testen. For fremtidige undersøgelser kunne en videreudvikling af en sodtest være på sin plads, gerne med en metodik, der illuderer de fysiske forhold som ofte gør sig gældende i historiske bygninger, hvor kolde vægoverflader fremmer partikeldeponeringen fra varmere luftstrømme. Desuden foretages den standardiserede test ved uforstyrrede forhold, hvilket ikke kan formodes at være tilfældet under virkeligt brug, hvor varierende luftbevægelser kan forårsage blafrende flammer og øget sodning fra lys.
Koncentrationstestene har desuden vist, at der er en signifikant forskel på i hvert fald de mest og mindst partikelafgivende lysformer, hvor bloklyset kun forårsagede et gennemsnitligt partikelniveau på 38% af kronelyset, og 34% af kanallyset (alle ren stearin).
På baggrund af test- og feltmålingerne kan det konkluderes, at partikelekspo-neringen af kirkers interiør kan reduceres ved to tiltag: udskiftning til mindre forurenende lystyper eller ved hurtig udluftning eller luftrensning efter brugen af levende lys. Kanallyset af ren stearin er en udbredt lystype i mange danske kirker, men er også den lystype, der udleder flest ultrafine partikler. Man burde derfor, ved at ændre lys- og vokstype kunne mindske forureningen fra de levende lys. Det umiddelbart bedste alternativ til kanallys i ren stearin vil være kronelys i palmestearin. Den absolut laveste partikeludledning opnås med olielyset. Her kan udformningen dog begrænse brugen, da olielyset i sin lidt buttede beholder umiddelbart kun kan erstatte bloklys.
Hvad angår udluftning, virker dette mest effektivt i starten, hvor partikelniveauet er højest. Derfor behøves udluftningen ikke at vare længere end en halv til en hel time efter lysene slukkes, for at opnå en betydelig effekt. Dette kan formentlig indpasses i kirkepersonalets arbejdsrutiner, og er en simpel metode til at sænke partikelforureningen hurtigt og omkostningsfrit. Det er dog vigtigt at forholde sig til, at dette kan komme i konflikt med andre klimahensyn, især om vinteren hvor den kolde udeluft kan forårsage et meget tørt indeklima.
I disse tilfælde kan mekanisk luftrensning benyttes i stedet for udluftning. Selv med den lidt underdimensionerede luftrenser, som blev benyttet i denne undersøgelse ved testen i Uggeløse Kirke, fandt vi en 38% forbedring i forhold til blot at lade kirkerummet stå aflukket hen. Med en større luftrenser, hvor kapaciteten matcher kirkerummets størrelse, vil man kunne opnå en effekt, der ligner udluftning ved gennemtræk (≈63% forbedring). En yderligere fordel er, at med en luftrenser med høj-effektivt filter (HEPA filterklasse) vil den recirkulerede luft være partikelfri. Dette kan man ikke være sikker på ved udluftning, hvor udeluften risikerer, at være mere eller mindre forurenet af brænderøg eller trafikudstødning, afhængig af lokalitet, tidspunkt, samt vind og vejr.
I tilfældet ved Lynge Kirke afholdes der ca. tre kirkelige handlinger (eksempelvis begravelser) om måneden, ud over den ugentlige gudstjeneste. Dette medfører en samlet partikeldosis på rundt regnet 35 mio. partikel-timer årligt, forudsat at kirkerummet ikke udluftes aktivt efter brug. Baggrundsniveauet for ultrafine partikler lå ved vores gentagne besøg i kirken på 2000-2500 pt/mL, hvilket i sig selv giver en årlig partikeldosis på rundt regnet 20 mio. partikel-timer. Med andre ord udgør dosis fra levende lys knap 2/3 af den samlede eksponering for ultrafine partikler i kirkerummet. Her er dog flere ubekendte; selvom vi kan formode kilderne til den partikelforurening, der stammer udefra (og som forårsager baggrundsniveauet), nemlig landbrug, trafik, og brug af brændeovn i boliger omkring kirken, så kender vi ikke den præcise sammensætning af partiklerne. Vi kan heller ikke vide, om enkelte fraktioner af partikelforureningen tilsmudser mere end andre, og præcis hvorledes det står i forhold til belastningen fra den sod, som stammer fra levende lys. Der er dog ikke synlig tilsmudsning omkring vinduer og andre ventilationsveje, der kunne angive en særlig høj forureningsbelastning udefra. Endelig er det svært at vide, i hvor høj grad partikelforureningen fra levende lys afsættes på væggene som

hvidlige, uforbrændte voks-aerosoler, i forhold til den mere synlige sorte sod. På den ophængte teglflise i koret kunne en begyndende grå tilsmudsning måles efter et år, men endnu ikke registreres med det blotte øje. Det er dog åbenbart fra de renseprøver som konservatorer har foretaget i hvælvet, at tilsmudsningen over en længere årrække har været markant (Figur 1-2).
For både udluftning og luftrensning er det vigtigt at understrege, at disse tiltag kun nedsætter den eksponering, der finder sted i tidsrummet efter lysene er slukket. Vælger man samtidig lys i mindre sodende vokstyper, eller olielys, reducerer dette partikeludledningen under afbrænding. Det mest effektive indgreb vil selvfølgelig være at eliminere brugen af levende lys helt, og eventuelt erstatte med elektriske alternativer. Dette kan dog være et drastisk valg, som blandt andet kolliderer med æstetiske overvejelser og ønsker om en særlig stemning i kirkerummet.
Endelig må det nævnes, at der foregår en debat på sociale medier og i presseomtale af levende lys, omkring de miljøforhold som palmestearin og palmeolie kan være produceret under. Ligeledes er der mange udsagn omkring hvorvidt paraffin er bæredygtigt, da det produceres af mineralsk olie. Det testede palmestearinlys var tilfældigvis mærket økologisk, men vi har i øvrigt ikke forholdt os til denne debat, men kun kvantificeret materialernes partikeludledning.

Konklusion

Levende lys udleder i varierende grad ultrafine partikler til luften når de brænder. Der kan dog observeres store forskelle på udledning alt afhængig af lysets form – hvor opsamlingen og opvarmningen af smeltet voks måske spiller en rolle – samt på vokstype.
Hvad det sidste angår, finder vi, at ren stearin forårsager højere partikelkoncentrationer end bivoks og paraffin, der igen forårsager højere udledning end palmestearin. Det lavest partikeludledende lys var baseret på flydende vegetabilsk olie. Det har ikke været mulig at graduere tydeligt, hvor meget de forskellige lys soder under uforstyrrede forhold. Kun for lys, hvor flammen blafrer eller brænder skævt fandt vi en tydelig sodeffekt.
På samme måde fandt vi en tydelig effekt af at tænde levende lys i kirkerum, hvor partikelkoncentrationen derved steg på meget kort tid, med op til 300.000 pt/mL. Da partikelforureningen, der hænger i luften efter lysene er slukket, udgør en væsentlig del af den samlede partikeldosis (over en tredjedel for et aflukket kirkerum), kan den samlede eksponering som inventar og kalkmalerier udsættes for, nedsættes betydeligt ved udluftning eller mekanisk luftrensning. Dog er det springende punkt, som efterlader flere ubesvarede spørgsmål til yderligere forskning: Hvilke partikler forårsager den primære tilsmudsning af kalkmalerier, og i hvor høj grad skyldes den brugen af levende lys i forhold til andre forureningskilder? Vi anser nærværende studie som en påbegyndelse på afdækning af dette problemfelt, hvor dynamikker og niveauer ved partikeludledning fra levende lys nu er blevet kvantificeret.

Yhteenveto

Elävistä kynttilöistä lähtevien partikkelien ajatellaan aiheuttavan kalkkimaalin likaantumista. Testimittausten avulla tutkittiin vaikuttavatko eri kynttilöiden muodot tai eri vahat ultrahienojen partikkeleiden irtoamiseen. Paksuista kynttilöistä lähtee yleensä matalampi partikkelikonsentraatio kuin ohuista kynttilöistä ja puhtaasta steariinista enemmän partikkeleita kuin parafiinistä ja mehiläisvahasta. Vähiten irtosi palmustearii nista ja kasvis-/palmuöljykynttilöistä. Nokeentumistestit eivät kuitenkaan osoittaneet täysin samoja tuloksia partikkelikonsentraatiossa ja testilevyjen nokeentumisessa, joka saattaa olla selitettävissä että kaikki partikkelit eivät ole nokea vaan palamattomia vaha-aerosoleja. Epätasaisesti palavat kynttilät aiheuttivat selvää nokeentumista vahatyypistä huolimatta. Kahden kirkkosalin partikkelimittauksissa, jolloin oli sytytettynä 23 - 29 kynttilää, mitattiin partikkelitasoja jotka olivat välillä 220.000 - 320.000 partikkelia/mL ilmaa. Kynttilöiden sammuttamisen jälkeen oli ilmassa partikkeleita 37 % verrattuna kokonaismäärään kun kynttilät olivat sytytettyinä. Tätä osuutta voitiin vähentää ilmaa suodattamalla, tai vielä tehokkaammin tuulettamalla, jolloin saatiin luvuksi 18 % kokonaismäärästä. Lisäparannusta saadaan käyttämällä muita kuin stearii nikynttilöitä, kuten esimerkiksi kasvis-/palmuöljykynttilöitä tai olematta käyttämättä eläviä kynttilöitä.

Avainsanat: *kalkkimaali, kirkot, ennaltaehkäisevä konservointi, ultrahienot partikkelit, ilmansaaste, likaantuminen, noki, elävä kynttilä*

Abstract

Particles from candles are likely to cause soiling of wall paintings. In a test series it was investigated how candle's shape or type of wax affects the emission of ultra-fine particles. In general, thicker candles caused a lower concentration of particles than thinner ones, and pure stearin wax more particles than paraffin and beeswax. The lowest emission came from palm stearin wax candles and palm oil lamps. Soot deposit tests did not show a perfect match between particle concentration levels

and soot deposition. This may be due to the particles not all being soot, but perhaps unburned wax aerosols. For candles which burned unevenly the soot deposition was strong, regardless of type of wax. Measurements carried out in two churches, with 23-29 candles, showed particle levels between 220,000-320,000 particles/mL air. The continued exposure to particles remaining in the air after the candles were extinguished amounted to 37% of the total dose for one candle use-episode. This proportion could be reduced by air filtration, or more efficiently by venting, to 18% of the total dose. Further improvement can be achieved by using candles made of fuels other than pure stearin, e.g. palm oil, or, of course, to completely avoid the use of candles.

Keywords: *candles, soot, soiling, air pollution, ultrafine particles, preventive conservation, churches, wall paintings*

Anerkendelser
Vi takker menighedsrådet ved Lynge-Uggeløse Sogne (Helsingør Stift), for tilladelse til at udføre feltmålingerne i de to kirkebygninger, og personalet i kirkerne for stor hjælpsomhed under vores arbejde. Endvidere takkes Jørn Toftum, DTU Byg, Center for Indeklima og Energi, for lån af måleudstyr. Konservator Ida Haslund, Nationalmuseet, henledte vores opmærksomhed på kalkmalerierne i Lynge Kirke, og vi takker hende for inspirerende diskussion af problemerne med levende lys, sod og afrensning af kirkekunst.

Referencer

Afshari, A., Matson, U., and Ekberg, L.E. 2005. 'Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber'. Indoor Air 15(2): 141–150.

Camuffo, D. 2014. Microclimate for Cultural Heritage, Conservation, Restoration and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments, 2nd ed., San Diego: Elsevier Science, 526 pp.

EN 15426:2007. Candles – Specification for Sooting Behaviour. Brussels: CEN, European Committee for Standardization, 14 pp.

Fine, P.M., Cass, G.R., and Simoneit, B.R. 1999. 'Characterization of fine particle emissions from burning church candles'. Environmental Science & Technology 33(14): 2352-2362.

Grau-Bové, J., and Strlic, M. 2013. 'Fine particulate matter in indoor cultural heritage: a literature review'. Heritage Science 1(8): 1-17.

Huynh, C., Savolainen, H., Vu-Duc, T., Guillemin, M., and Iselin, F. 1991. 'Impact of thermal proofing of a church on its indoor air quality: the combustion of candles and incense as a source of pollution'. Science of the Total Environment 102: 241-251.

NORDJYSKE.DK, 04 april 2016. 'Lys brænder klokkeklart i Sæby Kirke'. Online: http://nordjyske.dk/nyheder/lys-braender-klokkeklart-i-saeby-kirke/07329419-31e9-46cd-af02-41197b47ff66/4/1513 (set marts 2017)

Pagels, J., Wierzbicka, A., Nilsson, E., Isaxon, C., Dahl, A., Gudmundsson, A., Swietlicki, E., Bohgard, M. 2009. 'Chemical composition and mass emission factors of candle smoke particles'. Journal of Aerosol Science 40 (3): 193-208.

Phoenix, A. and Burnstock, A. 1990. 'The deposition of dirt: a review of the literature, with scanning electron microscope studies of dirt on selected paintings'. I: Hackney, Townsend and Eastaugh (Red.): Dirt and Pictures Separated, Conference January 1990, London: UKIC & Tate Gallery: 11-18.

Trampedach, K. 2008. 'Nedbrydningsfaktorer og restaureringers indflydelse på kalkmaleriers oprindelige udseende'. Hikuin 34: 129-140.

Willhöft, F. and Horn, R. 2000. 'Candles'. I: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (7th ed.), Wiley Online Library, DOI: 10.1002/14356007.a05_029

Zai, S., Zhen, H., and Jia-Song, W. 2006. 'Studies on the size distribution, number and mass emission factors of candle particles characterized by modes of burning'. Journal of Aerosol Science 37(11): 1484-1496.

