

RAPPORT FRÅN RIKSANTIKVARIEÄMBETET

Bevarande inomhusmiljö?

Neutrala material i museimiljö

Monika Fjaestad (redaktör)

Finn Englund, Martin Ferm, Anders Karlsson och Einar Mattsson



RAPPORT FRÅN RIKSANTIKVARIEÄMBETET

Bevarande inomhusmiljö?

Neutrala material i museimiljö

Monika Fjaestad (redaktör)

Finn Englund, Martin Ferm, Anders Karlsson och Einar Mattsson

Riksantikvarieämbetet
Box 5405, SE-114 84 STOCKHOLM
Tel 08-5191 8000
Fax 08-660 72 84
www.raa.se
riksant@raa.se

© Riksantikvarieämbetet, 2010

Författare: Monika Fjaestad (redaktör, projektledare), Finn Englund, Martin Ferm,
Anders Karlsson och Einar Mattsson

Omslag: Konservator Kerstin Pettersson vid textilförvaring.

Foto: Monika Fjaestad, Riksantikvarieämbetet.

Grafisk form och layout: Åsa Östlund, Riksantikvarieämbetet.

Bildredigering: Karlis Graufelds, Riksantikvarieämbetet.

ISBN: 978-91-7209-566-3

Rapporten *Bevarande inomhusmiljö? Neutrala material i museimiljö* är finansierad
med hjälp av Riksantikvarieämbetets sektorsforskningsanslag, FoU.

Förord

Riksantikvarieämbetets konserveringsverksamhet var under 1990-talet engagerat i flera uppdrag kring magasinförbättringar, undersökningar kring nedbrytningsfaktorer och kurser i förebyggande konservering. Ett av målen var att hitta metoder för att långsiktigt förbättra luftkvaliteten i museimiljöer.

Projektet *Neutrala material i museimiljö* genomfördes under 2003–2004 med finansiering från Riksantikvarieämbetets FoU-anslag. Med omfattande undersökningar om luftföroreningars inverkan på fynd och föremål i museisamlingar studerades olika material. En viktig bakgrund för projektet kom ur tidigare studier som är sammanställda i boken *Tidens tand – förebyggande konservering*.

Genom fördjupade analyser av luftföroreningars inverkan på material och föremål ville projektgruppen ge konservatorer och museianställda verktyg för att upptäcka och minska luftföroreningar i museimiljön. Alla delar kring museiföremålens förvaring och bevarande har studerats med analyser av färger, bygg-

och förpackningsmaterial. Parallellt genomfördes fleråriga mätningar av luftföroreningar i museimiljön och mätstudier av emissioner från inredningsmaterial utfördes i laboratorier. Projektets resultat finns här redovisat i rapporten *Bevarande inomhusmiljö? Neutrala material i museimiljö*. Redaktör är Monika Fjaestad som också var projektledare.

Rapporten är ett värdefullt underlag för Riksantikvarieämbetet när det gäller rådgivning och rekommendationer vid inredningar av magasin, utställningar och förvaringsmöbler för musei- och kyrkoföremål. För framförda åsikter och sakupplysningar svarar författarna.



Inger Liliequist
riksantikvarie

Riksantikvarieämbetets sektorsforskningsanslag, FoU, syftar till att utveckla kunskapsuppbyggnad och stimulera till forskning om kulturarvet och kulturmiljön.

FoU-anslaget används för att stödja forskningsprojekt som befinner sig i mötet mellan kulturpolitik, kunskapsuppbyggnad om kulturmiljöer samt de vetenskapliga disciplinerna.

Innehåll

Inledning 6

Av Monika Fjaestad,

Luftföroreningars påverkan på kulturarvet 8

Av Monika Fjaestad

Bakgrund 8

Föroreningar 10

Referenser 14

Studie av inomhusmiljön i museer och historiska hus 15

Av Monika Fjaestad

Syfte 15

Bakgrund 15

Metod 16

Val av exponeringsplatser 17

Exponeringen 17

Resultat 18

Bedömning av korrosivitet i museimiljöer 23

Resultatbedömning 24

Slutsatser 25

Referenser 25

Inredningsmaterialens korrosivitet 26

Av Finn Englund

Bakgrund 26

Mätning av emissioner från inredningsmaterial 27

Referenser 36

Riskbedömning och åtgärder (luftföroreningar) 38

Av Monika Fjaestad

Kemisk nedbrytning 38

Förvaltning av kulturarv 38

Riskmiljöer 39

När behövs mätningar av emissioner? 39

Tillståndsbedömning 39

Riktlinjer avseende myr- och ättiksyra 42

Referenser 43

Figur- och tabellförteckning 56

Bilagor

1. Utveckling av enkel emissionstest, av Anders Karlsson 44
2. Metallkorrosion i inomhusatmosfär, av Einar Mattsson 46
3. Passiva provsamlare för mätning gasformiga föroreningar, av Martin Ferm 52
4. Vad är det för skillnad mellan ppb och $\mu\text{g}/\text{m}^3$?, av Martin Ferm 55

Inledning

Denna rapport sammanfattar FoU-projektet "Neutrala material i museimiljö" som pågick under åren 2000–2003. Mätresultat har även tagits med från projektet Neutrala material i montrar. Målen för projektet var att undersöka miljöpåverkan av organiska syror och att hitta de mest lämpliga inredningsmaterialen för att skapa en neutral, bevarande inomhusmiljö för kulturföremål. Tillvägagångssättet delades upp i fem delmoment.

1. *En mätstudie i museimiljö.*
Frågeställningen var: Hur korrosiv är luften i utställningen, magasinet eller skåpet?
2. *Mätning av emissioner från träskivor, träslag och färgbaser.* Frågeställningen var:
Vilka korrosiva ämnen och vilka mängder emitteras från olika inredningsmaterial?
3. *Utveckling av en enkel emissionstest för museibruk.* Frågeställningen var:
Hur testar konservatorn många material inför en utställning?
4. *Undersökning av luftföroreningars påverkan på kulturföremålens material.* Frågeställningen var:
Vilka luftföroreningar påskyndar nedbrytning av olika material och under vilka förhållanden?
5. *Riskbedömning och åtgärdsförslag.*
Frågeställningen var: Vilka miljöer innebär en risk för samlingarna och hur kan det åtgärdas?

Resultat från dessa fem delmoment bildar en effektkedja. Från den befintliga situationen till val av bättre inredningsmaterial och teknik som bevarar kulturföremålen på lång sikt.

Vår uppgift under många år har varit att stödja museerna i deras förbättringsarbete för bättre bevarandeförhållanden. Att ge entydiga svar är vanskligt. Med detta projekt har vi en bättre underbyggnad för rådgivning.

Liknande delstudier med andra metoder har utförts av Getty Institute i USA, University of East

Anglia i Storbritannien och på Nationalmuseet i Danmark. Genom jämförelser med dessa projekt kan vi se samstämmighet och avvikelser.

I vår studie användes de metoder som utvecklats av Svenska korrosionsinstitutet, (numera Swerea KIMAB AB), Svenska miljöinstitutet AB (IVL), och Sveriges tekniska forskningsinstitut (SP).

Deltagare i projektet på RAÄ-AT har under åren varit:

Eva Lundwall, textilkonservator
Anders Karlsson, kemist
Åsa Norlander, konservator, arkeologiskt material
Jennie Sjöstedt, naturvetare
Emma Wikstad, kemist
Monika Fjaestad, projektledare

Anknutna experter har under åren varit:

Finn Englund, Sveriges tekniska forskningsinstitut (SP)
Sarka Langer, Sveriges tekniska forskningsinstitut (SP)
Martin Ferm, Svenska miljöinstitutet AB (IVL)
Eva Johansson, Lena Sjögren, Johan Tidblad, Svenska Korrosionsinstitutet, numera Swerea KIMAB AB
Folke Björk, KTH
Einar Mattsson, professor emeritus

Projektet har presenterats på tre möten inom nätverket Indoor Air Quality – Museums, på the Netherlands Institute for Cultural Heritage i Amsterdam, School of Biological and Molecular Sciences på Oxford Brookes University samt på School of Environmental Sciences, University of East Anglia.

I Danmark har projektet presenterats på Fuglsøseminariet för konservatorer från hela landet. En delegation från Norge har informerats om projektets resultat inför en ombyggnad av Hedmarkmuseet i Hamar.

Vid ett flertal tillfällen har projektet presenterats i Sverige. Delprojektet om museistudier har rapporterats till konservatorer och samlingsansvariga på seminariet om Mikroklimat på Tekniska museet år 2003. Alla involverade museer har informerats på två seminarier. Flera tillfällen till presentation har förekommit internt på RAÄ. På vår kurs Tidens tand har resultaten spridits till samlingsansvariga från ett tjugotal museer.

Medel för expertmedverkan och kringkostnader har erhållits från RAÄ:s FoU-anslag. Arbetstiden för

anställda på Riksantikvarieämbetet har bekostats av ordinarie verksamhetsanslag.

Vi vill härmed tacka alla medverkande internt och externt för ett kunskapsbringande samarbete.

De museer och kyrkor som vi har utfört mätstudier hos tackar vi särskilt. Det är Statens historiska museum, Nordiska museet, Nationalmuseum, Medelhavsmuseet, Etnografiska museet, Vasamuseet, Livrustkammaren, Skoklosters slott, Museum Gustavianum, Museet i Gamla Uppsala, Gotlands länsmuseum, Rackstadmuseum i Arvika och Storkyrkan i Stockholm.

Luftföroreningars påverkan på kulturarvet

Av Monika Fjaestad, RAÄ

Bakgrund

Luften – en livsbetingelse

Luften vi andas och som är drivkraft i allt biologiskt liv består av en gasblandning. Vår kroppsliga förbränning kräver syre, O_2 , som utgör 21 % av luftens sammansättning. Luften består i övrigt av 78 % kväve, N_2 , och resterande 1 % utgörs av ädelgaser, vattenånga, partiklar och spårgaser. Dessa spårgaser och partiklar är både naturligt alstrade och producerade av vårt samhälle. Förbränning av biologisk och teknisk art skapar energi men också avfallsprodukter i form av gaser och fasta ämnen. Vulkanutbrott och sumpmarker m.m. är naturliga källor till vad vi idag kallar luftföroreningar. Ordet föroreningar förmedlar oönskade avgaser som innebär ett hot mot hälsan och vår materiella kulturmiljö. De största källorna idag är industrin och transportsektorn.

Den synliga röken från elden har följt människans utveckling. Vi har därmed ett nedärvt, välutvecklat, luktsinne för upptäckt av rökluft. Det är något vi känner igen som ohälsosamt och vill undvika. Alla naturliga, traditionella material känner vi igen lukten av och kan förhålla oss till. Nya material och ämnen däremot har vi inga referenser till. Många ämnen i luften är i praktiken luktfria och luktsinnet ger oss ingen information om deras förekomst. Såväl ämnen som vi kan förnimma med luktsinnet som luktfria ämnen kan medföra fysiologiska effekter, inklusive allergiska reaktioner. Hälsoeffekter berörs dock inte i någon större utsträckning i denna rapport, då projektet "Neutrala material i museimiljö" är inriktat på den påverkan luften har på material och föremål.

Materialpåverkan av luftens naturliga beståndsdelar och av dess föroreningar är i allmänhet direkt beroende av deras koncentration. Lokalt eller regionalt höga koncentrationer av luftföroreningar leder till accelererade nedbrytningsprocesser på natur- och kulturarv. Exempelvis har försurande ämnen inverkan direkt i gasformigt tillstånd, men också då de följer

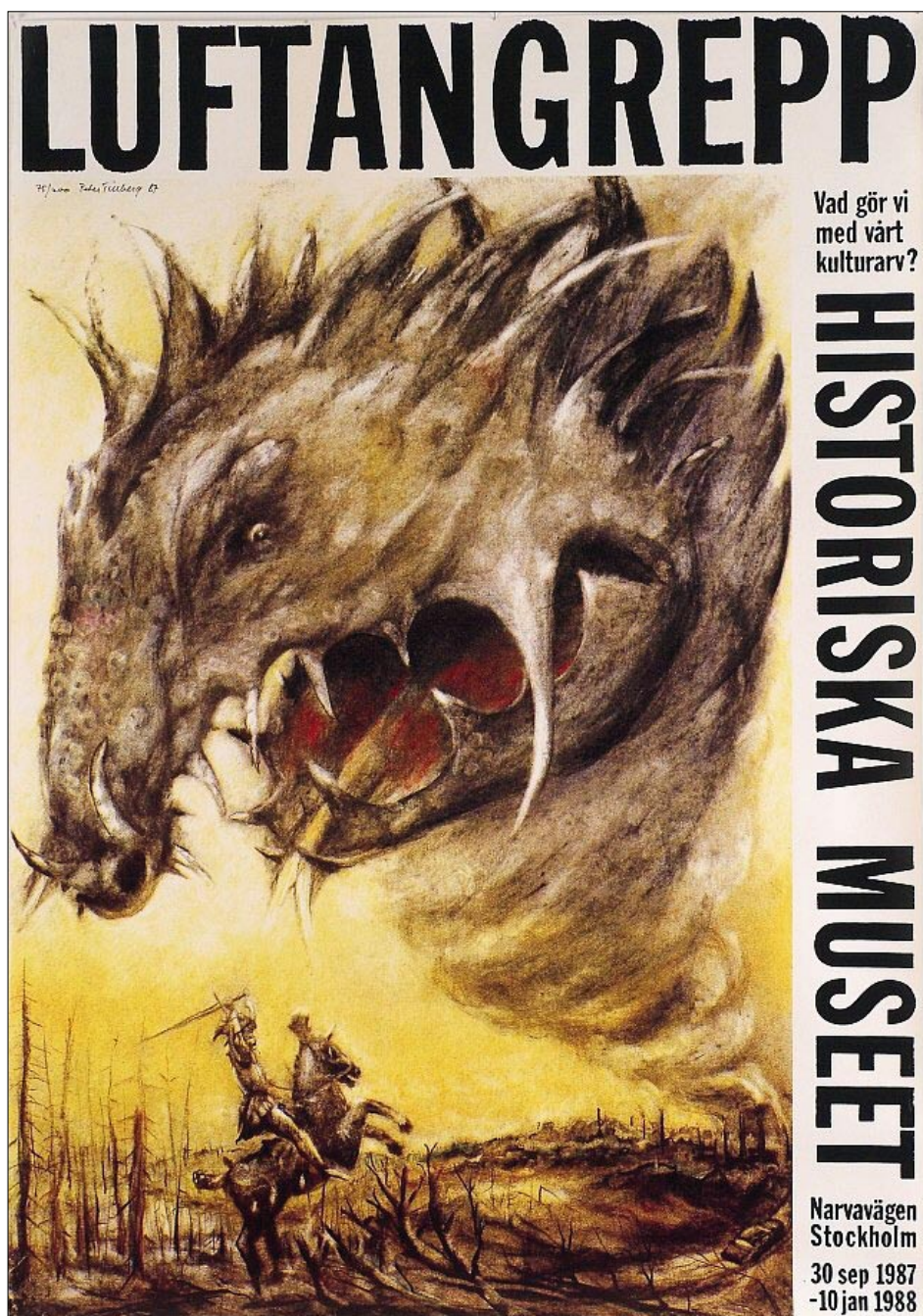
med nederbörd, och resulterar i skador på växt- och djurliv, sjöar, skog och mark. Därutöver har många av luftens föroreningar en starkt förstörande inverkan på många slag av våra byggnadsverk och annat som betraktas som skyddsvärt och som vi räknar till vårt kulturarv. Byggnader av kalk- och sandsten visar stora vittringsskador, bronsskulpturer och koppartak korroderar med större hastighet, och föremål av många andra material åldras snabbare.

Luftföroreningar förr och nu

Förbränning av fossila bränslen har pågått sedan brytningen av kol startade i större skala under medeltiden i England. I de större städerna bildades så kallad smog som var en kombination av rök och dimma. Restriktioner för koleldning utfärdades därför redan på tolvhundratalet. Stora mängder svaveldioxid bildades av koleldning (Brimblecomb 1986:149). Vid en svår smog i London år 1952 blev överdödligheten cirka 4000 personer. Jämförelser gjordes tidigt med Paris som inte hade samma problem, där värmdes bostäderna med ved.

Under senare hälften av nittonhundratalet blev oljeeldning vanligt i urbana miljöer. Det är idag främst avgaser från förbränning av oljeprodukter i motorer som förknippas med luftföroreningar. Olja är renare än kol som kan innehålla upp till 6 % svavelföreningar (Brimblecomb 1986:109). Trots växande trafik har utsläpp av svavelföroreningar i luften sjunkit under de senaste 20 åren med hjälp av luftrening och katalysatorer. Kväveoxider och växthusgaserna CO_2 och CH_4 ökar dock. Som vi ser finns det en lång historia.

På det norra halvklotet är de förhärskande vindarna västliga. I Skandinavien har vi därför fått ett ackumulerat nedfall av försurande ämnen från industrier i Europa, som förutom vår egen produktion, påverkar vår miljö både ute och inne.



Figur. 1. Luftangrepp, affisch av Peter Tillberg. Foto: Bengt A. Lundberg, RAÄ.

Forskningsutveckling

Atmosfärisk kemi kallas det vetenskapliga området som undersöker luftens sammansättning och hur fukt, spårgaser och luftföroreningar inverkar på materialen i vårt natur- och kulturarv. Denna tvärvetenskapliga disciplin utvecklades under 1950-talet av främst C. E. Junge och G.O.S. Arrhenius. Luften är vår nödvändiga, gemensamma tillgång. Hotet i urbana miljöer mot denna livsnödvändighet drev fram många forskningsprojekt och miljörörelser under slutet av

1900-talet. FN anordnade år 1972 den första stora miljökonferensen om luftföroreningar i Stockholm. Alla viktiga byggnadsfasader rengjordes inför mötet för att visa omvärlden vår "rena" stad.

Europarådet fokuserade på luftföroreningarnas påverkan på kulturarvet genom kampanjen "Byggnadsvårdsåret" 1975. Frågor om stenkonservering aktualiserades internationellt. Samtidigt anordnades en internationell konserveringskongress i Stockholm i regi av the International Insitute for Conservation,

(IIC). Konserveringen av skeppet Vasa stod naturligt i centrum. På konferensen togs frågor upp om emitterande material i museimiljö. Inom konserveringsområdet såg man tidigt luftföroreningarnas påverkan på t.ex. byggnadsfasader. På Riksantikvarieämbetet (RAÄ) och Statens Historiska museer (SHMm) skapade man år 1987 utställningen "Luftangrepp" med konservator Tord Andersson som drivande arrangör (fig. 1). Samtidigt ordnades en internationell konferens om luftföroreningarnas nedbrytande verkan på kulturarvet. Konservering kom i fokus och frågorna fick politiskt genomslag. Medel för forskning tilldelades RAÄ-SHMm, det så kallade luftföroreningsanslaget.

Riksantikvarieämbetets Institution för konservering, RIK, bildades med Ulf Lindborg som chef. Främst satsades på forskning om luftföroreningarnas påverkan på kulturobjekt i utomhusmiljön. En försvinnande liten del gick till forskning om inomhusmiljön. Gunnel Werner, som var chef för metallkonserveringen på RIK, startade ett projekt där korrosiva material i museimiljö undersöktes. Delar av studien presenterades år 1987 på Jubileumskonferensen på the Institute of Archaeology, University of London. Denna forskning har byggt en grund för vår studie.

I England och London kom arkiv- och museisamlingarna att tidigt bli föremål för särskilda bevarandeinsatser på grund av problem med smog och genom de stora evakueringarna under andra världskriget. Samlingarna värderades högt av det politiska etablissemanget. Redan år 1967 anordnades en konferens på The National Gallery om klimatlära för museer av The International Institute for Conservation, (IIC). På konferensen avhandlades ämnen som luftföroreningar, kontroll av luftfuktighet, ljusförhållanden och museums- och ventilationsplanering. Redaktör för konferenspublikationen var Garry Thomson, vetenskaplig rådgivare på The National Gallery. Han undersökte kunskapsläget och sammanställde år 1978 boken *The Museum Environment*. Denna publikation har blivit ett fundament för det tvärvetenskapliga området som kallas förebyggande eller preventiv konservering. Museimiljön är avgörande för ett långsiktigt bevarande. Andra viktiga pionjärer var W. A. Oddy tidigare chef för konserveringen på British Museum, Gael de Guichén på ICCROM och Tim Padfield som under många år var forskare på Nationalmuseet i Danmark. Idag finns flera forskare inom området där jag vill nämna Peter Brimblecombe, professor i miljövetenskap, University of

East Anglia och May Cassar konservator, professor på The Bartlett School, University College of London och numera Director of UK Science & Heritage Research Programme.

Nedbrytande verkan – korrosivitet

I vårt samhälle finns en vilja och strävan att bevara objekt från svunna tider. Allt har inte kunnat skyddas mot förgängelse och det naturliga kretsloppet, men åtskilligt är bevarat. Det har funnits goda betingelser för detta i vårt land. Sverige har inte varit krigsskådeplats på många hundra år. Klimatet är kallt och våra bostäder har varit uppvärmda och relativt torra under vintern. Landet är stort till ytan med en liten befolkning – luften har varit ren på landsbygden. I de större städerna har produktionen av luftföroreningar ökat under nittonhundratalet. Det är också här i städerna vi finner de flesta stora museer.

Luftföroreningar är inte bara hälsovådliga för den biologiska miljön. Dessa gaser och spårämnen har nedbrytande verkan på olika material. Det fysiska kulturarvet i form av byggnader, interiörer och föremål påverkas kemiskt. Alla luftföroreningar utomhus finns i mindre grad i inomhusmiljön men de ackumuleras, fastnar där i större grad. Vissa föroreningar bildas inomhus som svavelsyra, ozon, organiska syror samt aldehyder m.fl. När det gäller bevarandet av kulturföremål i historiska hus och museer är det viktigt att tänka på att skydda dem från föroreningar från utomhusluften och från gaser som alstras av material i inomhusmiljön.

Föroreningar

Svavelföreningar

Den mest emitterade och utforskade luftföroreningen är svaveldioxid (SO_2). Det är den dominerande föroreningen i surt regn och är skadlig för människor, natur och kultur. SO_2 oxideras i vattendroppar slutligen till svavelsyra (H_2SO_4) med inverkan av katalysatorer (t.ex. metallpartiklar). Svavelsyra är frätande på många material främst på metaller och kalkhaltiga stenmaterial. Fibermaterial av cellulosa som papper och textil, men även läder som är uppbyggt av proteinfibrer, tappar sin fiberstyrka. Fotografiska filmer och fotografiska skikt på glasplåtar kan också brytas ner. Vissa färgpigment förändras.

Svavelsyra (H_2S) är en gas som luktar som ruttet ägg. Den bildas vid nedbrytning av organiskt material



Figur 2. Blybulla skadad av luftburna organiska syror (a) och blybulla efter konservering (b).

Foto: Gunnel Jansson, RAA.

på land och till havs men alstras även av människor och djur. En person kan emittera $100 \mu\text{g H}_2\text{S}$ per timme i ett vanligt klassrum (Wang 1975:32–44). Vulkaniserat gummi och arkeologiskt vattendränkt material (som skeppet Vasa), utsöndrar sulfider. Karbonsulfid, (COS) avsöndras från hår, ull och fjädrar. Äggtempera som färgbas i interörmåleri emitterar även detta ämne. Sulfider korroderar alldeles särskilt silver även i mycket små koncentrationer som $1\text{--}10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tétreault 2003), men påverkar även andra metaller som koppar, brons och mässing.

Kväveföreningar

Kväveoxider i liten mängd bildas naturligt i haven. Genom förbränning av fossila bränslen bildas stora mängder i tätbefolkade områden. Kväveoxiderna är hälsovådliga i stora koncentrationer och påverkar andningsorganen. I smogsituationer med hjälp av solenergi, vid fotokemiska reaktioner, oxideras kväveoxiderna i vattendroppar till salpetersyrighet (HNO_2) och salpetersyra (HNO_3). Dessa syror är mycket korrosiva för de flesta material men särskilt när det gäller metaller, glas och kalksten. Huruvida kväveoxider oxideras till salpetersyra i inomhusmiljön är inte ännu helt klarlagt. Celluloid, cellulosanitrat ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), emitterar salpetersyra när det åldras.

Ammoniak (NH_3) bildas av urinämnen i naturen. Ämnet kan finnas i rengöringsprodukter för golv och glas. I starka koncentrationer kan kopparmetaller påverkas. Det har en stark lukt och kan därför undvikas.

Ozon

En variant av syremolekyl (O_3) bildas genom fotokemiska reaktioner av kväveoxider i avgaser. Gasmolekyl som är giftig kallas ozon och är mycket reaktiv. Vanligt syre (O_2) och vatten är tillsammans de ämnen som behövs för att en nedbrytning av de flesta material ska påbörjas. Finns det en tillgång av ozon startar en reaktion som är snabbare i sitt förlopp. Soliga dagar med mycket trafik alstras stora mängder ozon i markplan. I ett hus med självdrag eller mekanisk ventilation med inluft från markplan, sugas ozonet in i huset. Inomhus kan det finnas kopieringsmaskiner, laserskrivare, elektrostatiska luftrenare eller elsvetsar som alstrar ozongas. Kända skador som kan uppkomma är sprickbildning av gummi, blekning av vissa textiltfärger, samt förändring av bokband och fotografiska material.

Aldehyder

Den mest omtalade aldehyden är formaldehyd, (CH_2O). Den har visat sig vara en allergen och kopplas ofta samman med "sjuka hus" (Brimblecomb 1986). Formaldehyd finns ofta i inomhusluften och även i mindre koncentrationer i stadsluft. Gasen emitteras från trämaterial och från limmer i skivmaterial, golvsivor, heltäckningsmattor och betong. Ett särskilt emitterande ämne är urea-formalde-

Tabell 1. Luftföroreningar och deras påverkan på olika material.

Förening	Påverkan	Emissionskälla
Svaveldioxid, SO ₂	Korroderar metaller Skadar vanliga färger och textilfärger Missfärger och gör papper skört Reducerar textilfibers styrka Angriper fotomaterial	Externa källor, förbränning Få inomhuskällor idag, vanligast från kol-, olje- eller stadsgasförbränning tidigare
Kvävedioxid, NO ₂	Startar blekning av textilfärger Reducerar textilfibers styrka Förstör fotografisk film	Externa källor Nedbrytning av cellulosanitrat Förbränning av stadsgas
Ozon, O ₃	Sprickbildning på gummi Startar blekning av textilfärger Angriper fotomaterial Skadar böcker	Externa källor Fotokopiatorer, laserskrivare Elektriska insektsfällor Elektrostatiska partikelfilter
Vätesulfid, H ₂ S	Korroderar metall, speciellt silver	Externa källor Människor Dekorationsmaterial Ull och ulltextilier Vulkaniserat gummi Organiskt vattendränkt material
Karbonyl sulfid, (OCS eller ibland skrivet COS)	Korroderar metall, speciellt silver	Biokemiska och geokemiska processer i oceanerna
Myrsyra, HCOOH	Korroderar bly, zink och koppar-legeringar med hög blyhalt Angriper kalkhaltiga material Angriper mineralprover	Torkande färg, oxidation av formaldehyd, trämaterial
Ättiksyra, CH ₃ COOH	Korroderar bly, zink och koppar-legeringar med hög blyhalt Angriper kalkhaltiga material Angriper mineraler Angriper troligen papper, pigment och textilier	Trä och träprodukter, limmer och tätningsmedel Nedbrytning av cellulosacetat filmer
Formaldehyd, HCOH	Kan oxidera till myrsyra	Träskivor, lacker Termiska plaster
Partiklar	Nedsmutsnings, missfärgning Deposition av reaktiva sura partiklar eller basiska partiklar	Externa källor samt pollen, textilnedbrytning, stearinljus, insekter m.m.

Källa: Brimblecombe, Baer och Banks, egen översättning.

hyddlim som finns i många av dessa produkter. Vid hög luftfuktighet ökar emissionshastigheten. Fenol-formaldehyddlim och melamin-formaldehyd finns i liknande produkter men utsöndrar mindre mängder formaldehyd (SPNHC 1995). En stor källa inomhus är också tobaksrök. I gamla naturhistoriska samlingar finns preparat som förvaras i en vätska (formalin) där formaldehyd ingår. Dessa konserveringsvätskor används sällan numera. Formaldehyd oxideras till myrsyra vid måttlig luftfuktighet och utgör därför en risk för museiföremål.

Acetaldehyd (CH₃HCO) finns i PVAc-limner som är det vanligaste snickarlimmet. Den största källan i arkiv och museimiljöer är från acetatfilmer. Aldehyden oxideras till ättiksyra som har en stark lukt. Acetaldehyd finns också i trämaterial.

Organiska syror

Det som skiljer syrorna från andra kolväten är dess funktionella grupp – COOH. Den enklaste syran är myrsyra, (HCOOH). Ättiksyra, har två kolatomer (CH₃COOH). Dessa syror kallas ibland korta syror.

Nästa syra, propansyra, har tre kolatomer i molekylen. Sedan bygger det vidare till större och större molekyler. Det är dock så att de minsta syrorna är de mest korrosiva. De ingår som nedbrytande ämnen i det naturliga kretsloppet. Där gör de stor nytta. I museimiljön där vi vill bevara material är de en skadefaktor. De organiska syrorna finns även i inomhusmiljön och emitteras från inredningsmaterial som träpaneler, träskivor, kartong och betong m.m. En stor källa är limmer i skivmaterial. De material som påverkas är metaller, vissa glassorter och kalkhaltiga keramiska material. Syrorna bildar lösliga salter som kan få glasyrer och emaljer att vittra. Cellulosafibrer som finns i papper och textilier försuras och tappar hållfasthet. Naturhistoriska föremål som vissa mineraler, fossiler och snäckor kan förändras. Pärlor och pärlmor bör skyddas från dessa syror. Vissa färgpigment kan ändra färg och blekas.

VOC

I samlingsnamnet VOC, Volatile Organic Compounds, som betyder flyktiga organiska föreningar,

ingår de organiska syrorna som en liten del. Det finns omkring 12 000 flyktiga organiska föreningar (Englund, muntligt uppgift). Att mäta VOC innebär inte att man erhåller ett mått på koncentrationen av organiska syror. Det som uttrycket refererar till i dagligt tal är ofta halten organiska lösningsmedel i luften. Det kan handla om alkoholer, ketoner, terpenener och farligare ämnen som bensen, toluen och cancerogena kolväten. Dessa ämnen är förknippade med viss påverkan på bärnsten, vissa plastmaterial och bindemedel i måleri. När det gäller arbetsmiljö och ur hälsosynpunkt är det viktigt att mäta dessa flyktiga lösningsmedel.

Partiklar

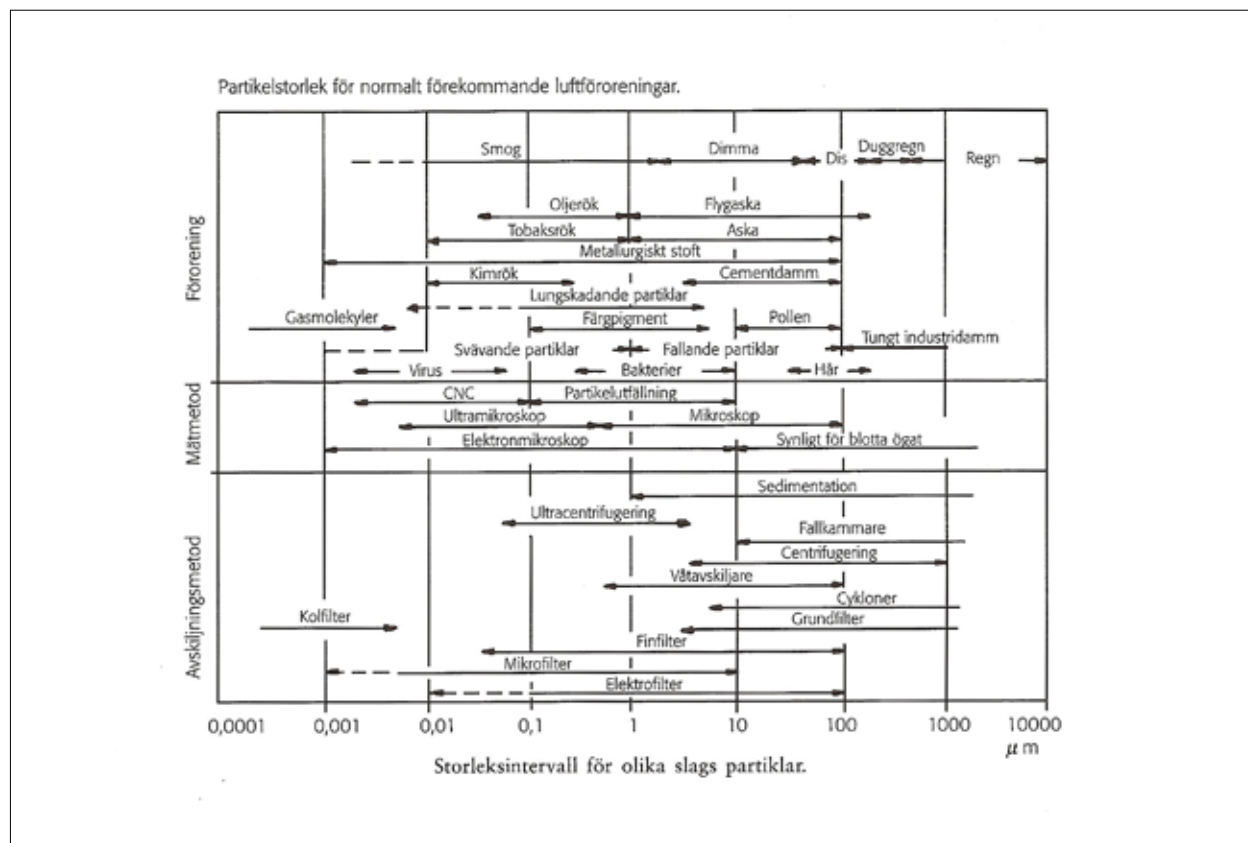
Fasta ämnen som bryts ner bildar dammpartiklar. Små dammkorn kan sväva i luften för att långsamt bilda ett lager på en yta. Stora tyngre dammkorn håller sig på "mattan". Dessa dammsamlingar är synliga och är därför lätta att avlägsna med en duk, borste eller en dammsugare.

Damm är "jättepartiklar" och är synliga ner till 10 mikrometer, 10^{-5} m. Vid en storlek under 1 mikro-

meter, 10^{-6} m, (μm) svävar partiklarna och kan inte längre ses mer än som ett dis i större koncentrationer. Gasmolekylerna är de minsta partiklarna med en radie på cirka 10^{-10} m. Både organiska och oorganiska material finns i det vi kallar damm.

Partiklar kan bära på salter och syror som tar upp fukt. Små mikoreaktioner kan ske på materialytor som sedan kan öppna upp för andra reaktioner. I närheten av kuster bildas mikroskopiska saltvattendroppar (aerosoler). Sprayer som används i hemmet sprider även aerosoler som innehåller olika ämnen. Metallpartiklar fungerar ofta som katalysatorer vid oxidationer t.ex. när svavelsyra och salpetersyra bildas i små vattendroppar (aerosoler) i luften (Brimblecombe 1986).

Damm kan vara hygroskopiskt och tar då upp fukt från luften. Det kan bidra till kemisk kondensation på metallytor och därmed till korrosion, se bilaga 2. Svampsporer och frömjöl från växter är synliga i större ansamlingar och med god tillgång av fukt kan mögelsporer gro och ett nedbrytningsförlopp startar på organiskt material. Sot och matos innehåller ofta "feta ämnen" som är särskilt vidhäftande på alla ytor.



Figur 3. Storleksintervall för olika slags partiklar, mätmetod och motåtgärd (ur "Tidens tand").

Referenser

- Brimblecombe, P. 1986. Air composition & Chemistry, Cambridge University Press.
- Cassar, M. 1995. Environmental Management, Guidelines for Museums and Galleries. Routledge.
- Endt, D.W., von Erhardt, W.D. & Hopwood, W.R. 1995. Evaluating materials used for constructing storage cases. Storage of Natural History Collections. Vol. 1, SPNHC, Dep. of Geology, University of Iowa.
- Fjaestad, M. (red.) 1999. Tidens tand. Förebyggande konservering. Riksantikvarieämbetet.
- de Guichen, G. 1980. Climate in Museums, ICCROM.
- Martin, D. 2000. Guidelines on Pollution Control in Museum Building, Museum Practice, Museums Association. London.
- S.S.C.R. 1989. The Scottish Museums Association, Environmental Monitoring and Control, Preprints Symposium in Dundee.
- Tétreault, J. 2003. Airborne Pollutants in Museums, Galleries and Archives: Risk Assessment, Control Strategies and Preservation Management, Canadian Heritage.
- Thomson, G. 1978. The Museum Environment. Butterworths and IIC.
- The London Conference on Museum Climatology, 1967, IIC.
- Wang, T. C. 1975. A study of bioeffluents in a college classroom. ASHRAE Trans.

Muntliga uppgifter

Finn Englund, kemist, SP Träteknik

Studie av inomhusmiljön i museer och historiska hus

Av Monika Fjaestad, RAÄ

Syfte

Undersökningens syfte var att synliggöra dolda skaderisker för museisamlingarna som finns i den befintliga museimiljön. Ett delmål var att hitta en "enkel" exponeringsmetod som är applicerbar för museibruk för att kunna mäta och bedöma luftkvalitet i museimiljön. Resultaten från exponeringarna ska i största mån vara jämförbara och kvantitativa. Metoden ska ge en indikation på vilka föroreningar som förekommer i en specifik miljö för att kunna åtgärda skaderisker. Resultatet ska ge en bild av den ackumulerade påverkan som är förorsakad av de annars osynliga föroreningarna.

Bakgrund

En av museernas grundfunktioner är att skydda och bevara sina samlingar. Museerna byggdes för att klara detta åtagande i den tid som de skapades för. Museibyggnaden i sig är det främsta skyddet. Där har utställningar, magasin och arkiv skapats efter tidens kunskap och erfarenhet. Nya museer byggs upp och gamla byggs om. I en sådan process kan ny teknik och beprövade material skapa en bättre bevarandemiljö. Gamla hus är byggda med självdrag och med föreställningen om att luften utomhus var ren och frisk. Historiska hus som slott och kyrkor är tidsdokument i sin helhet. Dessa monument eller tidskapslar tål ofta bara små ingrepp av ny teknik.

Under 1900-talets lopp har förutsättningarna förändrats. Luftföroreningarna har ökat och kunskapen om atmosfärisk kemi och miljötänkandet har fördjupats. Hälsoproblem och allergier som härleds till inomhusmiljön har blivit ett problem i samhället.

Undersökningar om luftföroreningarnas negativa påverkan på hälsa och material i utomhusmiljön har varit många i Sverige under slutet av 1900-talet. Forskning kring luftföroreningarnas påverkan på hälsan har fördjupats.

Inom konservering av museiföremål har iakttagelser och undersökningar gjorts i mer än 30 år om hur inomhusmiljön och inredningsmaterial påverkar kulturföremål (Oddy 1975:235–237). Den så kallade British Museum Standard-test (Oddy-testen) utvecklades för att påvisa skadliga emissioner från inredningsmaterial och började utföras redan i slutet av 1960-talet (se bilaga 1). Denna metod spreds snabbt till andra konserveringsinstitutioner. Gunnel Werner insåg tidigt på 1980-talet att emissioner från inredningsmaterial, packmaterial och luftföroreningar kan ha nedbrytande påverkan på samlingar (Werner 1987:185–187). Samarbete om undersökning av korrosiva material och miljöer startade mellan Gunnel Werner på Riksantikvarieämbetets institution för konservering (RIK) och bland andra Svenska Korrosionsinstitutet. Efter 1990 intensifierades samarbetet med institutets f.d. chef prof. em. Einar Mattsson. Metallkuponger av silver och bly användes som indikatorer för skadliga föroreningar. Det var främst genom viktjämförelser och visuella bedömningar som korrosionsangreppen på kupongerna bestämdes. Inredningsmaterial klassades och en rekommendationslista sammanställdes.

I USA och på flera platser i Europa utfördes en stor undersökning i början av 1990-talet om förekomsten av organiska föroreningar som formaldehyd, myrsyra, acetaldehyd och ättiksyra i museimiljöer. Forskare knutna till the Getty Conservation Institute utförde studien (Grzywacz & Tennent 1994:164–170).

Vid den stora ombyggnaden inför Guldrummet på Statens historiska museum åren 1994–1995 testades inredningsmaterial och ny teknik för luftrening av montrar installerades. I utställningen ingick metallföremål av alla kategorier, alltså inte bara guld. Guld är som bekant den ädla metallen som inte påverkas av luftföroreningar. För att utvärdera resultatet användes silverkuponger och digitala klimatloggar. Institutionen för konservering, RIK, var involverade med rådgivning och utförandet av tester.

Inför en utställning är tiden alltid knapp, utställningsledaren behöver snabba svar. Alla tester bör redan vara utförda och dokumenterade. Enkla snabba analyser efterfrågades. Vid detta arbete aktualiserades behovet av fördjupad kunskap om inomhusmiljön. Frågor radade upp sig. Vilka är de mest aggressiva föroreningarna? Vad är en korrosiv miljö? Hur stora mängder kan man tillåta i en bevarande miljö? Hur ser dessa miljöer ut i jämförelse med andra inomhusmiljöer?

I förundersökningen för projektet Neutrala material i museimiljö år 1999 kontaktade vi Dr. Martin Ferm på Svenska Miljöinstitutet (IVL) angående passiva provsamlare för korrosiva gaser. Kontakten var härmed etablerad. IVL hade just utvecklat passiva provsamlare för aldehyder och organiska syror (se bilaga 3).

Genom förnyade kontakter med Sv. Korrosionsinstitutet (Swerea-KIMAB) år 1999 fick vi inblick i den stora fältundersökning som E. Johansson utfört som en del av sin licentiatavhandling (Johansson 1998). Undersökningen behandlade korrosivitets-

och miljömätningar inomhus på platser som kontrollrum inom pappersindustrin och kärnkraftverk, i lagerlokaler och kulturmiljöer. Vi hittade genom hennes undersökningar en kvalitativ och mindre kostsam metod för museibruk.

Metod

Syftet med Korrosionsinstitutets fältexponering år 1998 var att prova och utvärdera en metod att bedöma miljöer genom exponering av metallkuponger och passiva provsamlare för mätning av korrosiviteten i inomhusmiljöer och därmed ge en möjlighet att hitta motåtgärder. Studien kom även att ligga till grund för utarbetande av ett system för klassificering av miljöer som senare utvecklades till en ISO-standard. Undersökningen fokuserade på mätningar av klimat och luftföroreningarna SO_2 , NO_2 , NH_3 , O_3 , H_2S samt partiklar. Standardiserade metallkuponger av silver, koppar, zink och kolstål användes som korrosionsprover (Johansson, E. 1998). Metaller reagerar med olika föroreningar i luften, (se bilaga 2) och påvisar



Figur 4. Exponering av provsamlare och metallkuponger samt mätning av temperatur och relativ luftfuktighet.
Foto: Gabriel Hildebrand, RAA.

ett korrosionsmått genom kupongernas viktökning. Viktökningen anges i mg/m². Genom denna stora undersökning på 42 platser har en databas med referensvärden byggts upp på Swerea KIMAB AB, som är ovärderlig för andra undersökare och bildar basen för ISO-standard 11844-1,2,3.

Vi hade tidigt planerat att använda metallkuponger i vår studie. När vi fick närmare information om undersökningen bestämde vi oss för att beställa standardiserade metallkuponger. Att framställa egna kuponger är inte oöverkomligt, svårigheten är att väga in och väga ut dem på ett strikt kontrollerat sätt. På Swerea KIMAB utfördes vägningen i ett klimatiserat vågrum med kalibrerade precisionsvägar. I den standardmodell som användes ingick tyvärr inte blymetallen som korrosionsprov.

Fokus för vår studie var att undersöka korrosiva ämnen i inomhusmiljön med speciell inriktning på organiska korrosiva emissioner. Den metall som reagerar starkt på organiska syror är bly. Vi valde att utöka de fyra standardmetallerna med en blykupong i samma storlek och utförande som de andra kupongerna. I vår studie exponerade vi således kuponger av zink, bly, silver, koppar och kolstål. På grund av att resurserna var små gjorde vi en enkel uppsättning på varje plats.

På Svenska Miljöinstitutet AB, IVL, hade man just utvecklat passiva provsamlare för emissioner som formaldehyd, acetaldehyd, myrsyra och ättiksyra. Provsamlarna fångar gasmolekyler från luften i en adsorbent. Efter exponering skickades de till IVL för analys. Det är av stor betydelse att analyserna utförs på ett och samma laboratorium för att få likvärdiga resultat. Dessa ger efter analys en genomsnittlig koncentration i µg/m³ (se bilaga 3). Vi hade även önskat mäta svavelväte men provsamlare för ämnet var ännu inte framtagna.

Val av exponeringsplatser

För att få ett så stort spann av mätresultat som möjligt valde vi platser med olika förutsättningar. Olika utgångspunkter utgjordes av trafikläge, landsbygd–stad, nybyggda–äldre, ventilation/luftrening–självdreg,

avfuktning–befuktning, olika träinredningar och skåp, magasin–monter, utställningssalar–historiska inredningar och tempererad–arktisk miljö. Urvalet av plats gjordes tillsammans med den kontaktperson vi samarbetade med på varje museum eller kyrka.

De institutioner vi valde var Statens historiska museum, Nordiska museet, Nationalmuseum, Medelhavsmuseet, Etnografiska museet, Vasamuseet, Livrustkammaren–Skoklosters slott, Museum Gustavianum, Museet i Gamla Uppsala, Gotlands länsmuseum, Rackstadsmuseet i Arvika, Sveagruvans museimagasin på Svalbard och Storkyrkan i Stockholm.

Studien genomfördes åren 2000 och 2001. Miljöerna har förändrats sedan dess. I vissa historiska miljöer är det fortfarande svårt att påverka luftens kvalitet i inomhusmiljön.

Exponeringen

Ett litet ställ av mässing förfärdigades med metallkrokar klädda med krympslang. De fem metallkupongerna hängdes med cirka 1,5 cm mellanrum. I var ände av stället hängdes en provsamlare för aldehyder respektive myrsyra och ättiksyra.

De passiva provsamlarna exponerades under cirka 30 dagar, i några fall längre. Tiden är inte avgörande eftersom ett medelvärde av koncentrationen räknas ut efter analys.

Metallkupongerna exponerades under 6 månader för att kunna ingå i Swerea–KIMAB:s referenssystem som har mätdata från samma tidsintervall. En kortare tid hade varit att föredra i en normal arbets-situation. Det innebar att vi gjorde 15 exponeringar år 2000 och 12 exponeringar år 2001. Värden från två av dessa uppsättningar har inte tagits med på grund av misslyckad hantering. Det återstår alltså 25 exponeringsplatser, se tabell 2. Två platser, C1 och M2 har inte ingått vidare i alla delar av studien på grund av att en blykupong försvann under exponering (C1) och att en exponering gjordes utomhus i arktisk miljö (M2). I tabell 2 beskrivs mätvärden från 24 platser. Ordningen i alla diagram är upplagda efter blykupongernas viktökning. Därför är punkterna i diagrammen endast 23.

Beskrivning av mätplatser

Tabell 2. Beskrivning av platserna samt totala mätvärden för myrsyra + ättiksyra.

Nr	Plats	Exteriör	Interiörmiljö	Syror C1 + C2, µg/m³
A1	Etnografiska museet 1 Textilskåp	Utkant av Stockholm, byggt 1980	Björklamell med björkplywood ventilerade lådor. Källarplan, klimatvent. ≈ 50 % RF. Vägg målad betong, linoleumgolv.	180
A2	Etnografiska museet 2 Lacksåp		Björklamell med björkplywood, stängt. Källarplan, klimatvent. ≈ 55 % RF. Vägg gipsplattor, linoleumgolv. Lackföremål, polykroma skulpturer.	116
A3	Etnografiska museet 3 Monter Amazonas II		Inbyggd, målade spånskivor, botten av MDF. Översta våningen, salen klimatstyrd ≈ 50 % RF. Blandat organiskt etnologiskt. Fjädrar, läder, trä, gummi, växtfibrer.	108
B1	Gamla Uppsala museum 2 Monter Östra högen	Landsbygd, byggt år 2000	Lackat stål, polykarbonat, MDF-botten. Avfuktad, renad luft ≈ 30 % RF. Kemfilter, Arkeologiskt, ben, brons, järn, keramik.	0,9
B2	Gamla Uppsala museum 3 Museisalen		Översta våningen, varmt på sommaren. Ovanpå AV-rum. Ej klimatstyrt, ej luftrening. Betongväggar, trägolv.	22,6
C1	Gotlands länsmuseum Möbelmagasin	Utkant av Visby	F.d. jordbrukskemiskt laboratorium, självdrag, övre plan. Betonggolv och väggar. Stoppade och vanliga möbler.	24
D1	Museum Gustavianum 1 Museisal	Mitt i Uppsala, invigt 1998	2:a våningen. Ovan monter om stormaktstiden. Ventilationssystem. Trägolv och putsade väggar.	313
D2	Museum Gustavianum 2 Monter		1:a våningen. Inredn. glas, metall, trä, textil. Ej klimatstyrt. Mumiemontern, tät enligt museet.	203
E1	Medelhavsmuseet Museisal	Mitt i Stockholm. Stark trafik	F.d. Islamutställningen, bakom skärm vid igensatt fönster. Trägolv, väggar vävklädda gipsplattor. Luftdrag från fönster mot trafikerad gata.	43,3
F1	Nationalmuseum 1 Kupolsalen	Diesel- och kolrök från båtar. Byggt år 1866	Bygge av utställning. Öppnade okt. 01 Lanternin, trägolv, putsade väggar. Klimatisering ≈ 50 % RF.	50
F2	Nationalmuseum 2 Målerimagasin	Dito	Övre plan. Hyllor eklaminat, trägolv, putsade väggar. Klimatisering ≈ 48 % RF. Joniserande luftrening. Måleri, skulptur, vaxposeringar m.m.	116
G1	Nordiska museet 2 Magasin 5	Utkant av Stockholm, byggt 1892–1907	Under putsat valv, golv av gran. Furuhyllor och masonit. Självdrag, matos från restaurang. Metallföremål, plast, sameföremål, trä, papper, m.m.	95
G2	Nordiska museet 3 Magasin 10	Dito	Se ovan. Inget matos. Träföremål, hantverksverktyg. Måleri på duk, speglar, m.m.	211
H1	Rackstad museet Målerimagasin	Utkant av småstad. Byggt 1994	Väggar och tak av betong, linoleumgolv. Självdrag. Målningar, skulpturer, textil.	6
I1	Skokloster slott 1 Slottsrum	Landsbygd, byggt 1654–1677	På spiselhyllan i Wrangelska barn-kammaren. Trägolv och putsade väggar. Självdrag, ouppvämt. Möblerat rum.	6
I2	Skokloster slott 2 Hyllor	Dito	Trähyllor för glasföremål i samma rum som ovan.	8
J1	Historiska museet 1 Centralmagasinet	Måttlig trafik. Byggt 1936	I träback av furu och plywood i kompaktsystem. Många backar i hyllorna. Klimatiserat ≈ 30 % RF. Arkeologiska metallföremål.	67
J2	Historiska museet 2 Tormmagasin, Västra Stallet		Samma backar som ovan men mindre mängd. Litet avfuktat rum ≈ 20 % RF, varmt. Arkeologiska metallföremål.	17
K1	Historiska museet Linnémagasinet 1 Stjärnsåpet		Textilskåp av betsad furuplywood, Furuhyllor. Ekparkettsgolv. Medeltida textil av siden, linne och metalltråd. RF ≈ 55 %, kolfilter.	367
K2	Historiska museet Linnémagasinet 2 Friggeboden		Textilskåp av björkplywood eller lamell. Annars samma som ovan. Översta vän. Klimatisering RF ≈ 55 %, kolfilter.	454
L1	Storkyrkan 1 Skrudkammaren	Mitt i Stockholm, Slottsbacken	Plan 2. Trägolv, putsade väggar. Intermittent fläkt. Textilsåp i rummet.	208
L2	Storkyrkan 2 Textilskåp		Träskåp, osäkert träslag, i skrudkammaren. Textilförvaring.	545
M1	Sveagruvan 1 Svalbard, museimagasin	Arktisk miljö	Väggar av bastuspont, gran, trähyllor. Mycket varmt när uppvärmning sker. Kolgruveverktyg, blandat etnologiskt.	34
M2	Sveagruvan 2	Utomhus	Arktisk miljö, torrt och kallt ute. Under ett träförråd. Organiska syror mättes ej. Metallkuponerna blåste ner.	
N1	Vasamuseet Tormmagasin	Nära kust. Ponton i torrdocka	Plåthyllor och kompaktsystem. Avfuktning RF ≈ 25 %. Golv av asfalt, väggar av betong. Förvaring av f.d. vattendränkta metallföremål.	0,9

Resultat

Mätvärden för organiska syror och aldehyder

De gaser som analyserades från passiva provsamlare var myrsyra och ättiksyra samt formaldehyd. Mätvärden för formaldehyd i undersökningen var

genomgående mycket låga och har därför inte tagits med i rapporten. Resultatet från mätningar av de minsta organiska syrorna har däremot stor spridning, se figur 6. De största koncentrationerna fanns i träskåp, magasin med träinredning och i montrar. I

avfuktade montrar och magasin återfanns de minsta koncentrationerna (under detektionsgränsen). Platser på landsbygden hade även mycket små koncentrationer, se figurerna 6 och 13.

Resultat av metallkupongernas viktökningar

De flesta metaller utom silver, guld och platinametallerna oxideras av syre och fukt i luften, se bilaga 2. När oxidationen sker bildas föreningar som är tyngre än den rena metallen. Dessa bildas på ytan och innebär en viktökning av kupongen. Syre och vattenånga finns överallt så en liten viktökning sker sålunda i helt ren luft. I förorenad korrosiv luft ökar vikten snabbare, metallen korroderar mer. För att bedöma korrosiviteten på grund av föroreningar måste därför hänsyn tas till en liten "naturlig viktökning".

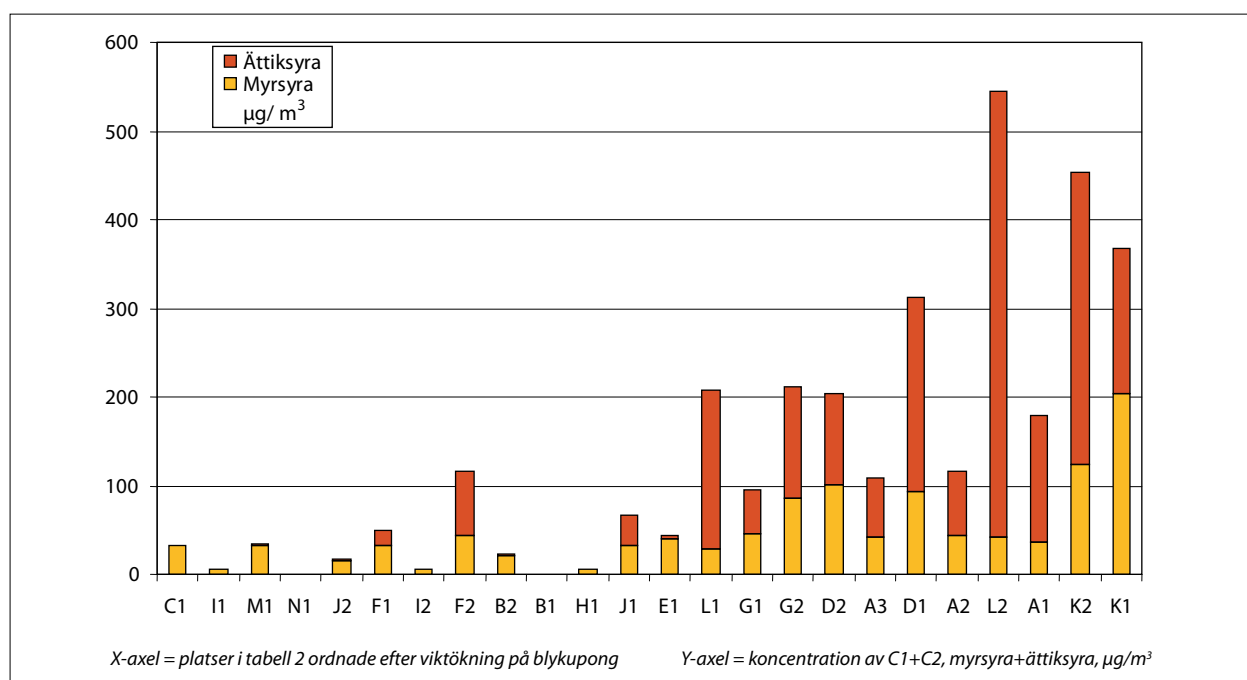
Silver

Silver oxideras av svavelväte, H_2S och karboxylsulfid, COS. Mycket små mängder i luften ($\leq 10 \mu g/m^3$) är tillräckliga för att oxidationen ska starta och fortsätta (Tétreault 2003:10). Silver påverkas inte nämnvärt av organiska syror. På sju platser visar silverkupongerna en viktökning $\geq 25 \text{ mg/m}^2$. Det är G1, G2, H1, B2, J2, M1 och N1. Det högsta värdet, 45 mg/m^2 uppmättes i ett metallmagasin, N1, där f.d. vattendränkta metaller förvaras. Troligen innehåller föremålen sulfider av



Figur 5. Trämateriell i museimagasin.
Foto: Monika Fjaestad, RAÄ.

olika slag. Förvånande nog har konstmagasinet, H1, som ligger i en småstad, utslag av hög viktökning, möjligen kan det bero på vedeldning i villor i närheten. Vi ser att två utställningssalar, B2 och i viss mån F1, har hög reaktion av svavelväte. Detta kan bero på dunster från besökare och avgaser från ångbåtar. Viktökning på silverkupongen $\geq 25 \text{ mg/m}^2$ indikerar korrosionsklass II enligt ISO 11844. Alla värden som understiger detta värde får korrosionsklass I.



Figur 6. Resultatet från mätningar av de minsta organiska syrorna.

Tabell 3. Mätresultat från samtliga platser. Ordnade efter fallande blyvikt, se figur 6.

Plats	Zink mg/m ²	Bly mg/m ²	Silver mg/m ²	Koppar mg/m ²	Klass ISO	Myrsyra µg/m ³	Ättiksyra µg/m ³	Fukt medelv.	Temp. medelv.	Trä	Interiör	Vent. system
K1	212	5597	neg.	17	2	203	164	47	22	Max	Skåp	V, B, K
K2	242	3218	1	18	2	124	330	48	21	Max	Skåp	V, B, K
A1	121	1528	9	19	1,6	37	143	49	18	Max	Skåp	V, B
L2	160	1175	8	8	2	42	503	42	21	Max	Skåp	V
A2	240	872	11	18	2	44	72	53	22	Max	Skåp	V, B
D1	69	863	1	14	1,6	94	219	33	23	Medel	Sal	V
A3	185	714	9	21	2	41	67	50	21	Medel	Monter	V, B
D2	115	710	neg.	14	1,6	101	102	36	22	Mindre	Monter	V
G2	98	684	27	23	2,3	86	125	38	22	Max	Magasin	V?
G1	115	490	39	20	2	46	49	29	23	Max	Magasin	V?
L1	74	378	9	8	1,6	29	179	42	22	Medel	Sal	
E1	114	362	21	26	2,3	40	3	43	22	Medel	Sal	V
J1	69	330	10	19	1,6	33	34	35	23	Max	Magasin	V
H1	35	262	38	19	1,6	5	1	35	22	Mindre	Magasin	
B1	49	233	19	21	1,3	0,4	0,5	29	25	Mini.	Monter	V, A, K
B2	53	230	39	24	2	21	1,6	31	20	Mindre	Sal	V
F2	42	202	17	19	1,3	44	72	50	x	Medel	Magasin	V, B
I2	29	168	6	12	1,3	5	1	48	19	Mindre	Trähylla	
F1	55	142	23	14	1,6	33	17	50	19	Mindre	Sal	V
J2	47	137	27	21	1,6	16	1	22	27	Max	Magasin	A
N1	50	112	45	18	1,6	0,4	0,5	25	24	Mini.	Magasin	A
M1	37	98	36	23	2	33	0,9	5	21	Max	Magasin	
I1	26	80	3	9	1,3	5	1	48	19	Mindre	Sal	
C1	45	Saknas	4	8	1,3	32	1	x	x	Medel	Magasin	

Klass = genomsnittlig korrosionsklass enligt ISO 11844 - 1 (justerad för 6 månaders exponering av koppar, silver och zink).
Ventilationssystem = aktivt ventilationssystem = V, befuktning = B, avfuktning = A, kol eller kemfilter = K.

Bly

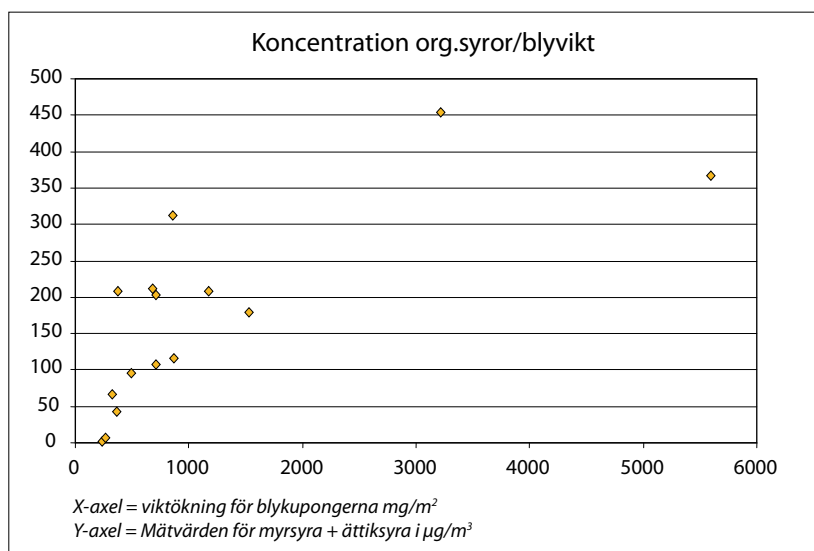
Bly påverkas starkt av organiska syror. Vid en jämförelse mellan viktökning på bly och koncentration av organiska syror på dessa platser finner vi ett samband (se fig. 6). Den "normala" viktökningen på bly, utan tillgång till organiska syror ser ut att ligga nära cirka 250 mg/m². Vi måste komma ihåg att exponeringstiderna här är olika långa, sex månader för kuponger och en månad för provsamlaren. Vi vet inte om denna första månad är helt representativ för de resterande fem. Spridningen av mätvärden beror på många faktorer som andra inverkande ämnen, mätosäkerhet, hantering, klimat m.m., naturliga variationer med andra ord.

De tre absolut högsta viktökningarna på bly har skett under exponering i skåp av trämaterial som innehåller textil, A1, K1, K2 och L2 (se tabell 2). Textil har stor upptagningsförmåga för luftföroreningar på grund av sin struktur. Gamla kyrkliga textilier innehåller ofta även metalltrådsbroderier. Metalltråden är tillverkad av mycket tunna metallfolier av guld, silver, förgylld koppar och legeringar. Det textila materialet består främst av ylle, siden och linne.

De lägsta värdena av viktökning på bly finns i avfuktade magasin och montrar samt på landsbygden där vi också har mycket små värden för organiska syror. När det gäller avfuktade torra magasin så är luftfuktigheten låg. Därför bildas ingen fuktfilm på metallytor och korrosionshastigheten avstannar. Emissioner från material hejdas av torrt klimat.

Enligt (Graedel 1992:52 se tabell) så kan man normalt uppmäta cirka 20 ppb (parts per billion) av myrsyra eller ättiksyra i en urban inomhusmiljö. Det motsvarar 38 µg/m³ myrsyra och 50 µg/m³ ättiksyra, (se bilaga 4). Det skulle ge ett mycket ungefärligt normalvärde av 88 µg/m³ av de korta organiska syrorna. Om vi ser närmare på de lägre mätvärdena (se fig. 7), ser vi att redan vid en koncentration av cirka 50 µg/m³ börjar en ökande tillväxt av korrosion på blykupongen.

Referensvärden för blykuponger som indikator för organiska syror har inte tagits fram av Korrosionsinstitutet (SCI). Det finns därför inte ett stort jämförelsematerial. Enligt Tétreault (2003) har laboriemätningar visat att viktförändring av bly börjar med en koncentration av ättiksyra vid 400 µg/m³



Figur 7. Jämförelse mellan de olika platsernas värden för viktökning på bly och sammanlagda värden för myrsyra och ättiksyra. Varje punkt är en plats.

och för myrsyra vid $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Värdet gäller så väl korttids- som långtidsexponeringar. Detta värde kallas NOAEL som betyder: nivån för icke observerad förändring. Eftersom vi i praktiken har en blandning av båda syrorna är det troligt att de samverkar i korrosionsförloppet.

Det finns alltså ingen korrosionsklassning enligt SCI-KIMAB och ISO 11844 för blykuponger. Enligt denna studie så kan en viktökning över $250 \text{ mg}/\text{m}^2$ anses indikera oönskade koncentrationer av de minsta organiska syrorna (se fig. 8). Förslagsvis lig-

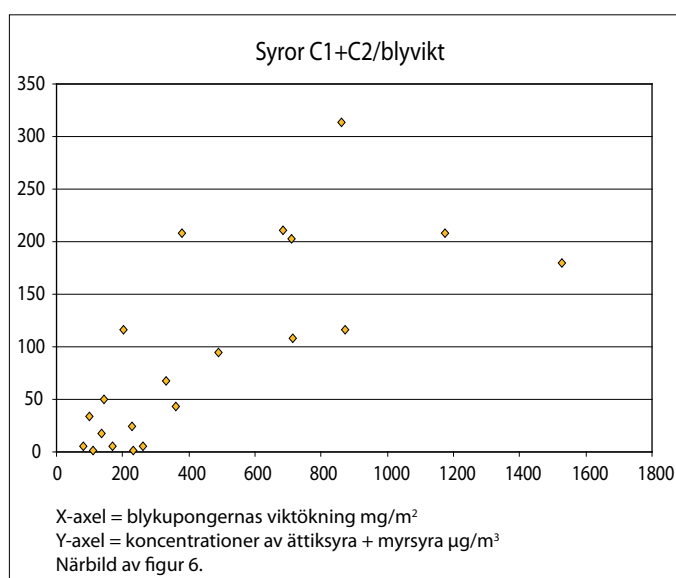
ger denna koncentration vid $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ för myrsyra + ättiksyra, vilket är under normalnivån i urban miljö som var $88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ enligt Graedel (1992:1962).

Zink

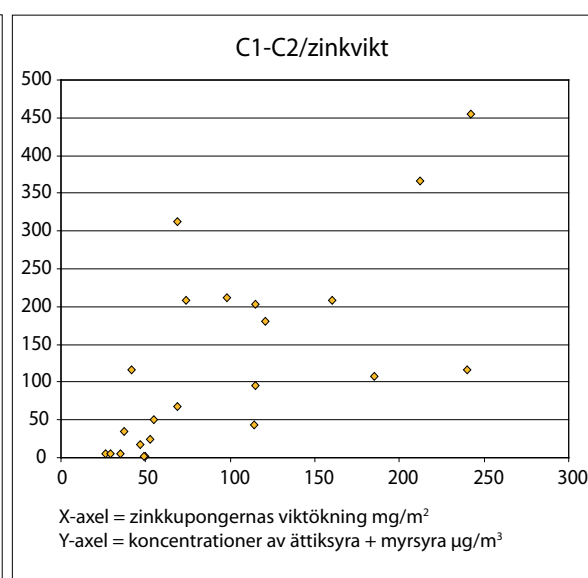
Zink reagerar med klorföreningar, svaveloxider och organiska syror. Metallen har ett bredare reaktionspektra än bly. Hög fuktighet bidrar till hög viktökning (Johansson, E. 1998). Synergieffekter spelar in mellan SO_2 , NO_2 och O_3 . I inomhusmiljö bildas zinkkarboxylater som korrosionsprodukt på zink under inverkan av organiska syror (Persson & Leygraf 1995:1468–

1477). I vår studie finns en viss korrelation mellan koncentration av de båda organiska syrorna och viktökningen på zinkkupongerna (se fig. 9). Den är dock inte lika samlat entydig som blymetallens reaktioner.

Zink är en av de standardmetaller som ingår i metoden för klassificering av korrosivitet i inomhusmiljöer. Klass 1: Mycket låg korrosivitet sträcker sig från 0 – $25 \text{ mg}/\text{m}^2$ för sex månaders exponering. Inte något mätvärde från våra provplatser visar så låg viktökning för zink. Av 24 platser har tio korrosivi-



Figur 8. Förstoring av del av fig. 7



Figur 9. Jämförelse mellan värden för viktökning på zink och myrsyra/ättiksyra.

tetsklass II, nio har klass III och fem har klass IV. Värdet av viktökningen på zink är det mest utslagsgivande av de fyra standardmetallerna.

Enligt Tétreault (2003) börjar viktökning för zink i laboratorieförsök vid en ättiksyrakoncentration av 20 000 µg/m³ i luften utan samverkan med andra föroreningar vid 54% RH. I vår studie ser vi ett samband med viktökning av zink vid 100 gånger mindre koncentrationer trots att RH ligger lägre än 54%. Synergieffekt med andra föroreningar kan här spela in.

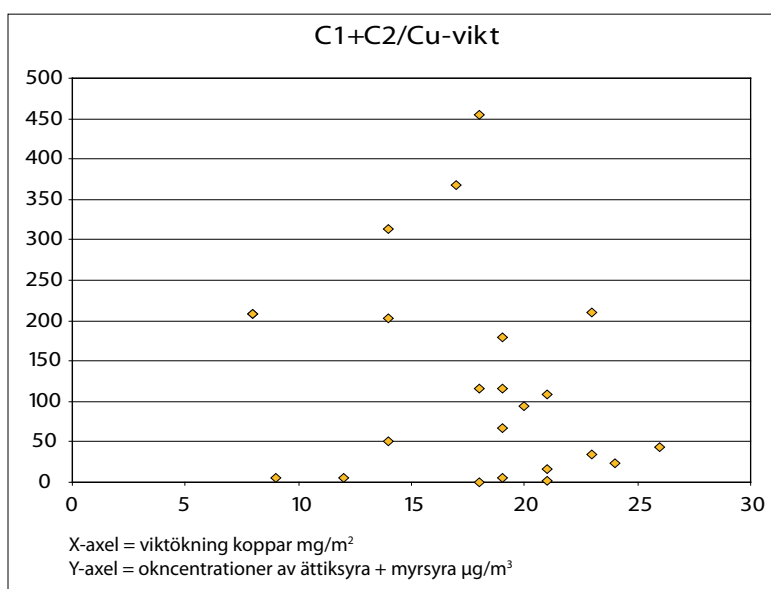
Koppar

Oberoende av fuktighet och föroreningar i luften bildas oxid på koppar, (Cu₂O), som har en skyddande verkan. Om svavelväte eller COS finns i luften bildas kopparsulfid, (CuS), som inte har en skyddande verkan för vidare korrosion. Dessa två reaktioner sker utan tillgång av fukt, s.k. torr korrosion. Svavelsyra som bildas av svaveldioxid i luften angriper kopparhaltiga metaller i en fuktig miljö och bildar kopparsulfat som korrosionsprodukt. Även organiska syror reagerar med koppar i inomhusmiljö. Kopparkuponger som har exponerats i Bernadottebiblioteket i Kungliga slottet visade sig genom kemisk analys vara till en del täckta av karboxylatsalter som bildas till stor del av myrsyra och ättiksyra (Persson & Leygraf 1995). I vår studie är viktökningen för kopparkupongerna tämligen likartad och oberoende av koncentration av organiska syror i luften (se fig. 10).

När det gäller klassificering av korrosiva miljöer ligger gränsen mellan mycket låg korrosivitet (klass I) och låg korrosivitet (klass II) vid en vikt av 23 mg/m². I vår studie har endast fyra platser klass II. Det är M1, B2, E1 och G2. Dessa platser har även högre viktökning på silver än genomsnittet. Det verkar som svavelföroreningar spelar större roll för korrosion på koppar än de organiska syror.

Järn

Viktökning av järnkuponger har inte tagits med i tabell 3. Många av de invägda kupongerna hade negativa värden vid utvägning. Av 24 exponerade



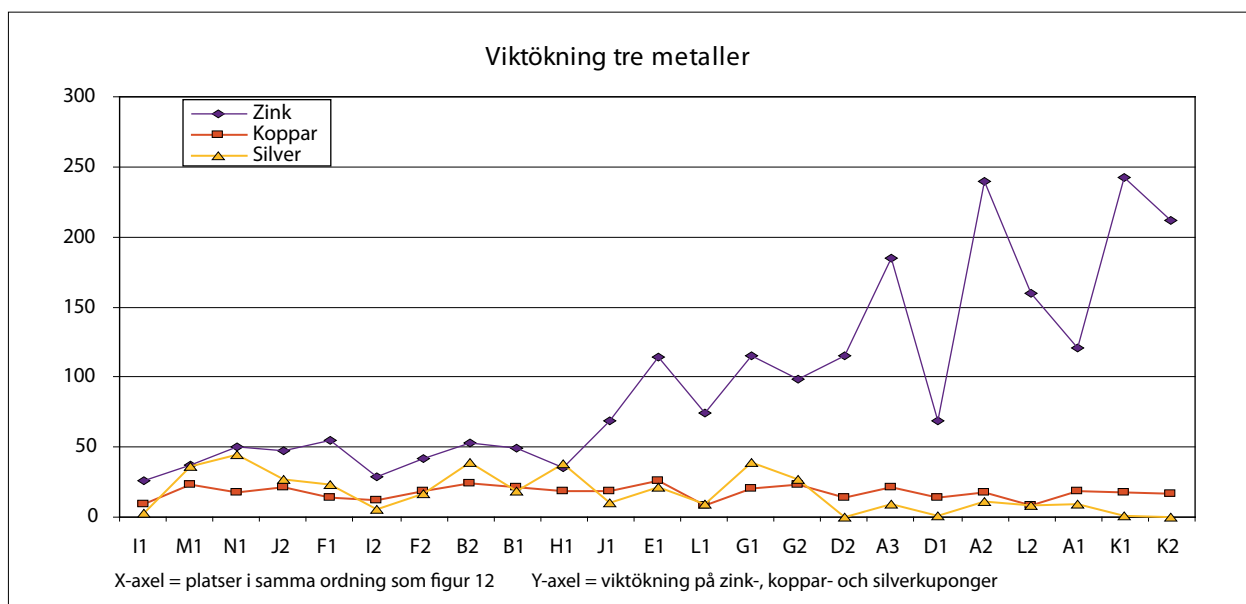
Figur 10. Jämförelse mellan värden för viktökning på koppar och myrsyra/ättiksyra.

kuponger hade tio minskat i vikt. De högsta värdena hade G1, E1 och A1. Samtliga viktökningar ligger inom klass I, mycket låg korrosion. Det är därför förvånande att nära hälften har korroderat så mycket att materia har fallit av kupongen i hanteringen. Viktförändringen kanske har andra orsaker som måtosäkerhet eller hantering. Därför har viktvärdena för järn uteslutits ur undersökningen.

Främsta orsaken till korrosion på metallrent järn inomhus är hög luftfuktighet och därtill lösta salter och syror i fuktfilmen. När det gäller arkeologiskt järn är det de inneslutna salterna i korrosionen som orsakar nedbrytning med hjälp av luftfuktighet. Processen påverkas av sura emissioner.

Luftfuktighet

De flesta (67%) av våra exponeringar pågick under sommarhalvåret. Det är den tid då den aktiva uppvärmningen av luften inomhus är minimal. Vid en jämförelse av variationerna av luftfuktigheten så är mätvärdena tämligen stabila på de flesta platser. I de avfuktade metallmagasinen och montrarna är luftfuktigheten kontrollerad och håller sina låga börvärden. Flera av de stora museerna har kontrollerad luftfuktighet för sina blandade samlingar med avfuktning och befuktning omkring ett börvärde av 50% RH. Under sommarhalvåret kan luftfuktigheten vara hög inomhus i hus med självdrag, utan ventilationskontroll. Detta har inte avspeglats i vår studie.



Figur 11. Viktökning för zink, koppar och silver per plats.

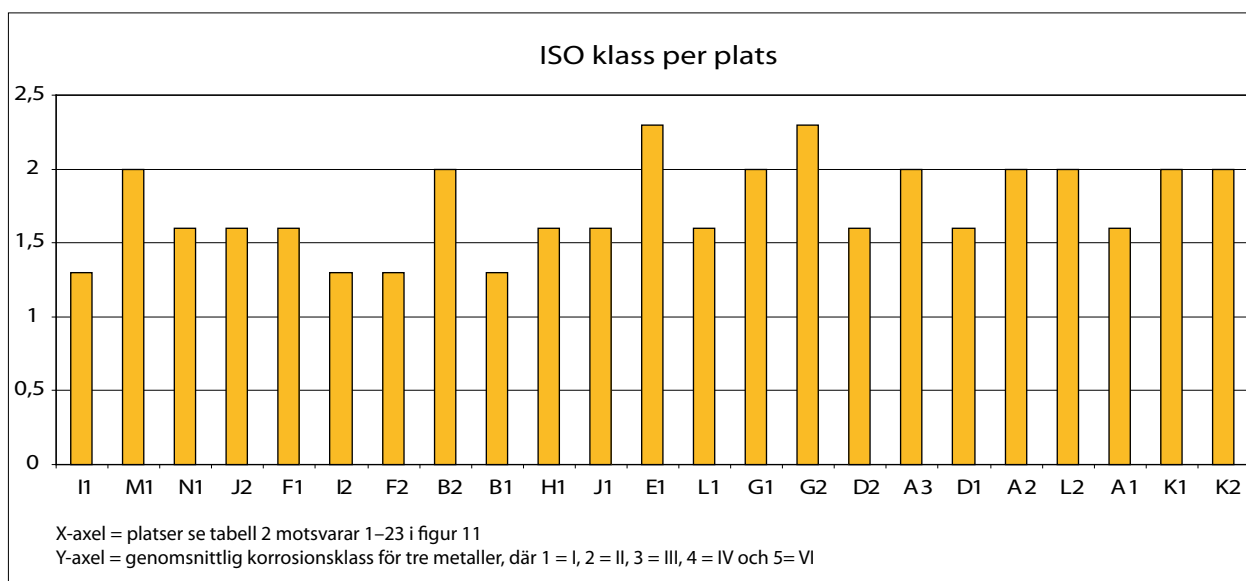
Genomsnittsvärdena för alla platser ligger på eller under 50% RH.

Mätningar på plats visar att fuktmängden i luften inte var pådrivande i korrosionsförloppet i vår studie.

Bedömning av korrosivitet i museimiljöer

Metallkupongernas viktökning kan användas som ett redskap för att klassificera, bedöma olika miljöers korrosivitet. På kupongerna kan vi mäta och analysera spår efter reaktioner med luftföroreningar. På silver och koppar ser vi svavelföreningarnas spår, på zink

och bly får vi bland annat ett resultat från påverkan av organiska syror. Sammanlagt kan vi indirekt bedöma den belastning av föroreningar som finns i en inomhusmiljö. Figur 11 visar viktökningar på tre av metallkupongerna på 23 platser som beskrivs i tabell 2 och 3. Enligt standarden ISO 11844 så kan vi göra en sammanlagd bedömning för samma 23 platser som visas i figur 12. En intressant iakttagelse är att silverkorrosion är lägre vid högre värde för zinkkorrosion. Det kan vara en tillfällighet som ser ut som en tanke. Det kan bli en fråga för vidare undersökning.



Figur 12. Klassning av korrosivitet i miljöer enligt ISO 11488.

På de nio statliga museer som ingår i studien borde strävan vara att luften ska ha egenskapen "very low corrosivity", alltså hålla sig inom klass I. Ingen av de museimiljöer som vi testat ligger inom klass I, som genomsnitt. Fyra miljöer ligger nära med 1,3 som genomsnittsvärde. Det är I1, I2, F2 och B1. De flesta (13) miljöer ligger inom nivån I–II, "low indoor corrosivity". Två platser har högre genomsnitt än 2 och ligger i spannet mellan II och III, medium indoor corrosivity. Dessa platser är belastade med påverkan av flera olika luftföroreningar. Klassificering av miljöer kan användas som jämförande redskap i en situation där en utvärdering pågår för förbättrade bevarandeförhållanden. Det viktiga är att metoden kan förklara vilka typer av föroreningar som är närvarande. Som vi har sett är de organiska syrorna en typ av föroreningar som ger stort utslag på zink och blykuponger. Det är främst viktökningen på zink som har höjt de genomsnittliga värdena. Museimiljöer bör ligga inom klass I, alltså mycket låg korrosivitet inomhus.

Resultatbedömning

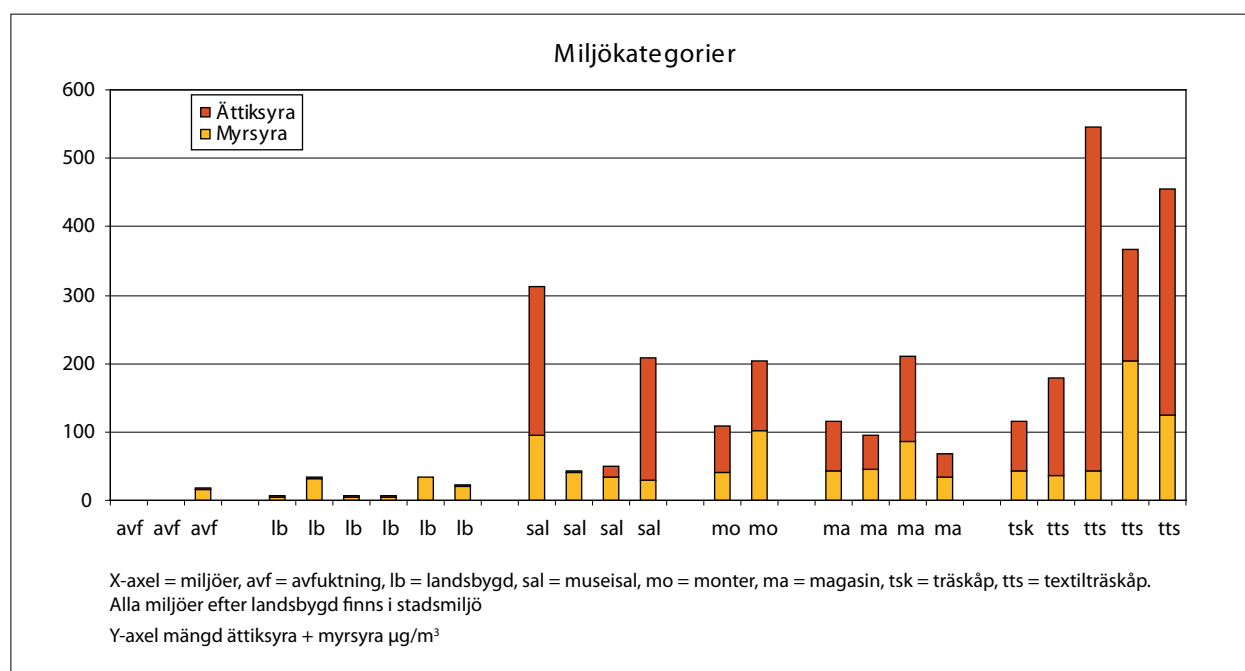
Museimiljöer är komplexa och påverkas av en mängd faktorer. För att komma verkligheten närmare behövs fler mätplatser än denna studie för att få ett säkrare statistiskt material. Alla samband är inte utredda och variationerna är stora men man kan skönja vissa trender. Vi kan se en spridning av mätresultat när

det gäller de minsta organiska syrorna. De passiva provsamlarna ger en relevant bild som bekräftas av viktökning på bly- och zinkkuponger. Metallkuponger av zink, bly, silver och koppar ger en sammanlagd bild över korrosiviteten (mängden nedbrytande luftföroreningar) på plats i miljön. Metoden vi valt har visat sig ge en tämligen tydlig bild av luftföroreningarnas närvaro. Mätosäkerheten i denna studie är inte värderad. Det finns många faktorer som spelar in. Synergieffekt som orsakar högre korrosionshastighet är konstaterad när det finns tillgång av SO_2 och NO_2 i luften (Johansson, L-G 1986:267–279). Det finns flera samband som inte är utforskade. För att gå vidare och i detalj analysera synergieffekter mellan föroreningar, bör forskning i kontrollerad laboratoriemiljö kunna ge nya rön.

Slutsatser

Metallkuponger och passiva provsamlare påvisar risker inte bara för metaller utan även för andra material i museer och historiska hus, (se tabell 1). Det är därför viktigt att veta vilka luftföroreningar som finns i utställningar, magasin, skåp och montrar. Vissa delar av samlingar är mer känsliga än andra och med kunskap om korrosiviteten kan en bättre omgivning skapas för dessa.

På landsbygden har vi lägre koncentrationer av organiska syror än i stadsmiljön, (se fig. 13). Värdena



Figur 13. Miljökatgorier.

ökar ju mindre ventilation som finns och ju mer trämaterial som finns i ett litet rum eller skåp. Med relativt hög luftfuktighet emitteras mer organiska syror och korrosiviteten ökar. Avfuktning av luften som åtgärd fungerar även som luftrenare för organiska syror men inte för avlägsnande av svavelväte. Det verkar som om syramolekylerna försvinner ut med fukten i luften. I två fall låg värdena under detektionsgränsen i avfuktade rum. När det gäller gamla, orörda miljöer på landsbygden som Skokloster slott där byggnad och föremål bevarats intakt under 400 år, är emissionerna från materialen troligen utvärderade sedan länge.

Blykuponger ger en tydligare bild än zink av närvaro och mängd av organiska syror vid exponering i en miljö. Järnkupongerna var inte användbara i vår exponering då nära hälften av värdena var negativa vilket betyder att vikten var lägre efter exponeringen. Tydligaste variationerna uppträder på silver, bly och zink. För exponering i museimiljö avslöjar dessa tre metallkuponger närvaron av de vanligaste skaderiskerna som svavelföreningar och organiska syror.

Klassificeringsmetoden ISO 11844 ger inte ett tydligt svar på frågan om det finns en bevarande atmosfär. Troligen skulle svaret bli tydligare om blymetallen ingick som standardmetall i metoden. Korrosiviteten är enligt modellen låg (II) i de flesta undersökta miljöerna men den kommer inte att hindra nedbrytning av material hos känsliga historiska föremål. I kontrollerade museimiljöer borde mycket låg korrosivitet (I) vara normen.

Referenser

- Graedel, T.E. 1992. *J. Electrochem. Soc.* 139.
- Grzywacz, C.M. & Tennent, N.H. 1994. Pollution Monitoring in Storage and Display Cabinets: Carbonyl Pollutant Levels in Relation to Artifact Deterioration, IIC Prep. Ottawa Congress, IIC London.
- Grzywacz, C.M. & Stulik, D. 1992. Carbonyl Pollutants in the Museum Environment, A.R.A.A.F.U., Paris p. 199–210.
- Johansson, E. 1998. Corrosivity Measurements in Indoor Atmospheric Environments – A Field Study, Dep. Of Materials Science and Engineering, Div. of Corrosion Science, Stockholm.
- Johansson, L.-G. 1986. A Laboratory Study of the Influence of NO₂ + SO₂ on the Atmospheric Corrosion of Steel, Copper, Zink and Aluminum. *Proc. Electrochem. Soc.* 86.
- Mattsson, E. 1987. Elektrokemi och korrosionslära. Korrosionsinstitutet, Stockholm.
- Oddy, W.A. 1975. The Corrosion of Metals in Display, IIC prep. Stockholm Congress, IIC London.
- Persson, D. & Leygraf, C. 1995. Metal Carboxylate Formation during Indoor Atmospheric Corrosion of Cu, Zn, and Ni, *J. Electrochem. Soc.* 142.
- Tétreault, J. 2003. Airborne Pollutants in Museums, Galleries and Archives: Risk Assessment, Control Strategies and Preservation Management, Canadian Heritage.
- Werner, G. 1987. Corrosion of metal caused by wood in closed spaces. In *Recent Advances in the Conservation and Analysis of Artifacts*. Ed. Black, J.
- ISO-Standard 11844-1, 11844-2 och 11844-3.

Inredningsmaterialens korrosivitet

Bakgrund

Av *Monika Fjaestad, RAÄ*

Inventarier av trä som skåp och montrar har alltid förekommit på våra museer. I de allra flesta kulturer har trä under långa tider varit det vanligast förekommande och mest självklara materialet för inredning. Den enkla anledningen är att inga alternativ har funnits med samma bredd vad gäller utseende, formbarhet och förhållande mellan styrka och vikt. Dessutom medför träs ätets långa traditioner som byggnads- och inredningsmaterial att många arbeten inte var förbehållna specialister utan kunde utföras av lekmän med någon erfarenhet.

En viktig aspekt på träs specifika egenskaper är dess fuktdynamiska uppträdande, med vilket menas att trä är ett fuktbuffrande material. Det kan därför minska svängningar i luftfuktighet och på så sätt skydda innehållet i ett skåp eller låda från förändringar. Detta har betydelse i en byggnad med stora svängningar av klimatet, t.ex. en kyrka eller ett historiskt hus som saknar modern teknik för värmereglering och klimatkontroll.

Kuriosakabinettet, museernas urmöbel, var ofta gediget, utsirat, kostsamt och tillverkat av ek eller valnöt. Det finns en mytbildning kring ekens bevarande egenskaper som kanske har sin upprinnelse i kabinettskåpen och de danska ekkistefynd. Enastående väl bevarade kvarlevor från bronsåldern som begravts i ekkistor grävdes där fram på 1800-talet. En utmärkande egenskap för ek är dess innehåll av tanniner (garvämnen), som sannolikt kan bidra till att skydda många slag av organiskt material, inklusive kroppar, från nedbrytning.

Andra träslag som har använts i museiinredning är björk, alm och ask; furu och gran i mindre utsträckning. Björk är ett träslag som lämpar sig väl för snickerier. Det är ofta kvistfritt och luktfritt, det utsöndrar inte hartser och har inte en uttalad skärriktning. Därför har björk ofta använts för tillverkning av textilskåp i kyrkor och museer.

I tiden före och under andra världskriget utvecklades en mängd nya material som plaster och nya typer av limmer, ytbehandlingar och träbaserade skivor. Vid transporter av krigsmateriel rapporterades korrosionsskador in till materialansvariga vid den Brittiska armén, Her Majesty's Stationery Office. En inventering och kunskapssammanställning publicerades år 1958 (Rance & Cole). Här finner vi de första dokumenterade observationerna om skador i slutna utrymmen. Tester utfördes genom accelererat åldrande med metallkuponer som indikatorer. De första restriktionslistorna skapades. Publikationen blev på grund av sin natur inte särskilt spridd i museisektorn.

Utvecklingen av träbaserade skivmaterial tog ordentlig fart efter kriget. Ett växande sortiment av mjuka och hårda träfiberskivor, spånskivor, plywood, blocklamellskivor m.m. fyllde olika nischer inom bygande, inredning och möbeltillverkning. Varunamn som Masonit®, Tretex® och Plyfa gjorde sig kända. Spånskivan lanserades på 1970-talet på bred front som byggmaterial och i möbler som sängar, skåp och bokhyllor för att följas av MDF (Medium Density Fiberboard) på 1980-talet. De lätt hanterbara och mångsidiga skivmaterialen gjorde det möjligt att producera montrar i museer kunde på mindre än en vecka. Utställningsscenerierna blev djärvare i både färg och form. Snart rapporterades om observerade förändringar på de utställda föremålen.

Gunnel Werner på Riksantikvarieämbetet började undersöka olika inredningsmaterial och dess emissioners påverkan på silver, koppar och järn. Ett projekt fokuserade på förebyggande konservering av silverföremål på Statens Historiska museum. Werner företog en inventering av lämpliga och olämpliga material för användning i museimiljö. En rekommendationslista sammanställdes och kom att spridas genom de museikurser som RIK anordnade under 1990-talet. British Museum Standard test (BMS) användes även av konservator Ingrid Hall Roth för att testa nya material men med en kvantitativ in- och utvägning av metallkuponerna. Resultatet angavs

som viktökning i procent. Rekommendationslistan reviderades inför kursen Tidens tand år 1997.

En viss osäkerhet var dock förknippad med dessa rekommendationer. Många referenser var äldre, materialen hade utvecklats, limmer modifierades, och nya fabrikat tillkom. BMS-testet gav dessutom inte alltid entydiga svar. Varudeklarationerna var inte heller helt upplysande för museibruk. Därför sökte vi en mer noggrann och jämförbar mätmetod. För att nå detta mål kontaktade vi SP-Trätek som använde och utförde FLEC®-metoden. Tillsammans med Finn Englund kontaktade vi svenska producenter av trämaterial och valde ut de produkter som skulle testas för museibruk. Studien får ses som en stickprovsundersökning och inte som heltäckande rekommendationer. Den stora naturliga variationen av halterna av flyktiga ämnen i trä gör det omöjligt att med precision fastställa ett emissionsvärde som är allmänt giltigt för ett visst träslag (Englund 1999, Granström 2005).

Mätning av emissioner från inredningsmaterial

Av Finn Englund, Sveriges tekniska forskningsinstitut (SP-Trätek)

Emissioner – vad är det?

De flesta material avger (emitterar) spontant kemiska ämnen i någon omfattning. Riktigt stora molekyler är för tunga för att ge sig av vid normala temperaturer, men de övriga betecknas som mer eller mindre flyktiga. En enkel bild av emissioner i allmänhet ges vid en jämförelse av uttorkning, d.v.s. emission av vattenånga. Detta sker ständigt från alla ytor och föremål, under förutsättning att ytorna innehåller högre halt av vatten än vad som motsvarar en jämvikt med omgivningen. Vi har ett självklart förhållande till uttorkning som fenomen, och det strävar vi ofta efter att förhindra, t.ex. ifråga om livsmedel och våra egna kroppar. Vi vet också att avdunstningen är starkt beroende av både temperatur och luftfuktighet (omgivningens halt av vattenånga) och att transporten kan ske i andra riktningen när luften är fuktig och materialen har ett lågt vatteninnehåll. Emissionerna av andra organiska och oorganiska ämnen följer samma principer.

När det gäller material för byggändamål och inredning är situationen lite annorlunda. Dels är inte avgivning av vatten särskilt betydelsefull, dels

påverkas inte egenskaperna hos själva de emitterande materialen i nämnvärd utsträckning. Det som är värt att studera närmare är de flyktiga organiska ämnena (på engelska volatile organic compounds, eller VOC), och de påverkar såväl luftkvaliteten i omgivningsluften som andra material och föremål. För museimiljön blir detta viktigare än kanske någon annanstans, inte nödvändigtvis för att föremålen i samlingarna är mera ömtåliga, men framför allt genom de krav vi ställer på minimal påverkan under mycket lång tid. Inverkan av ett material på ett annat är kanske mera en angelägenhet för museivärlden än för något annat sammanhang, och i övrig publicerad vetenskaplig litteratur ligger fokus nästan uteslutande på människors hälsa och välbefinnande (Wolkoff m.fl. 2006:7–19, Cain m.fl. 2002:283–296).

Först och främst förekommer en s.k. primär avgivning av ämnen som finns i materialet från början. De kan finnas jämnt fördelade i materialet, och när de avges från ytan vandrar ett tillskott fram från det inre så att det vid oförändrat omgivningsklimat uppstår en stabil situation med en avgivning som inte förändras med tiden. Många byggprodukter, inklusive trä och träbaserade skivmaterial, har en så stor tjocklek att depåerna av dessa ämnen inte uttöms nämnvärt under deras livstid. I ett tidigare skede ser man från en nyframställd yta att emissionerna från början är högre men klingar av mot en jämviktsnivå. Denna fas, med minskande avgivning, kan sträcka sig från några veckor till många månader.

En annan grupp av ämnen är de som nybildas i materialet eller i dess ytskikt genom inverkan av värme, fukt och luftens syre. Exempelvis sker en långsam oxidation av naturligt förekommande fetter i trä så att aldehyder frigörs, och en snabbare sådan reaktion sker under torkningsfasen hos en alkyd- eller oljefärg (Fjällström 2003, Wolkoff 1999:192–213).

Dessutom finns det man kallar sekundär avgivning, som består av föreningar som tidigare har transporterats genom luften och avsatt sig på ytan. Beroende på ytans egenskaper kan sådana ämnen sitta ganska hårt bundna och avges under lång tid. (An m.fl. 1999:297–316, Berglund m.fl. 1988:299–309, Jørgensen & Bjørseth 1999:17–27, Singer m.fl. 2004:2483–2494, Huang m.fl. 2006:236–247, Lee m.fl. 2005:183–196). Ett exempel är vissa komponenter i målningsfärg som kan vandra över till andra ytor än de målade och därifrån avges när materialet flyttas till ett annat utrymme.

Det vanligaste sättet att uttrycka styrkan hos emissionerna är som en källstyrka, eller en areaspacific avgivningshastighet. Man använder då vanligen enheten $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ (mikrogram per kvadratmeter och timme). Koncentrationer i rumsluft uttrycks i $\mu\text{g}/\text{m}^3$ eller ppm (parts per million).

Vad kan avges från trä och träbaserade material?

Trä har en doft. Det betyder att det är en del av träets egen emission som vi uppfattar med våra näsor. I många fall är näsan ett förträffligt analysinstrument med hög känslighet, men för många ämnen är vi ganska okänsliga och reagerar inte förrän höga halter uppnås. Denna känslighet varierar kraftigt från person till person, men det är få ämnen som vi med säkerhet kan känna igen och identifiera med doftsinnet. Mängdbestämning är förstås en ännu svårare uppgift, och det är därför nödvändigt att tillgripa instrumentella metoder.

Trä är ett så vanligt material i all byggnadsverksamhet och inredning att det ofrånkomligen måste beskrivas i sammanhanget av byggandet av utställningar, montrar, hyllor, lådor och andra förvaringsystem. Följande urval av de vanligaste träslagen har provats, och deras egenemissioner har karakteriserats: Furu, gran, ek, bok, björk, asp, al och ask. Furu intar en särställning genom att det har en väl urskiljbar kärnved som skiljer sig på många sätt från den yttre s.k. splintveden. De tekniska egenskaperna är olika, men även de kemiska, och därför har furukärna och furusplint studerats separat. Vanligen innehåller t.ex. regelvirke både kärna och splint, men det finns möjligheter att utesluta den ena sorten genom specialställning om man så önskar. Hos övriga träslag finns

ingen lika markant skillnad mellan kärna och splint, om det överhuvudtaget är urskiljbart. För dem finns således ingen anledning till separata provningar.

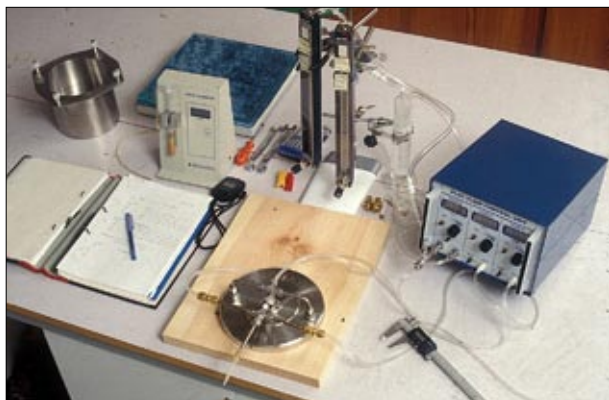
I emissionerna från barrved (i första hand furu och gran) dominerar terpenener fullständigt. Det rör sig främst om monoterpenkolväten som α - och β -pinen, 3-karen och limonen, men också oxygeniserade monoterpenener som terpineol och verbenol. Alla dessa har tio kolatomer i molekylskelettet, medan de mindre flyktiga seskviterpenerna, som kadinen, longipinen, muurolen och kubeben, har 15 kolatomer. Allt trä avger också aldehyder och karboxylsyror, och dessa utgör ofta den största delen av avgivningen från lövträ.

Undersökningsmetoder

För materialstudierna inom projektet Neutrala material i museimiljö har genomgående använts en provtagningsutrustning med namnet FLEC® (Field and Laboratory Emission Chamber). Den är en expanderingskammare i mikroformat och kan enklast beskrivas som ett kastrullock som läggs på en plan yta av det undersökta materialet. Volymen är endast 35 ml, och skillnaden mot en konventionell provningskammare är framför allt att provet inte placeras inuti utan alltså kommer att utgöra en del av kammarens vägg. Den stora fördelen med FLEC är den korta tid som behövs för jämviktsinställning och provtagning inklusive rengöring. Ren luft med kontrollerad fuktighet leds in genom en smal spalt runt kanterna, och luftströmmen som långsamt sveper över provet på sin väg mot utloppet i centrum för med sig de ämnen som avges från ytan. I en förgrening vid utloppet monteras en eller två små provuppsamlare, utvalda för ändamålet (fig. 14).

För allmänna flyktiga ämnen (VOC) används vanligen stålrör, packade med ett finkornigt adsorbentmaterial, Tenax TA®, med mycket små porer. Det fångar upp luftströmmens innehåll av ämnen, som senare kan "spolas" ut i en het ström av gas och vidare in i en gaskromatograf (GC) där blandningen separeras till enskilda ämnen och leds till en detektor.

De separerade ämnena ska sedan dels identifieras, dels mängdbestämmas. Viktig information ges av den tid det tar för passage genom gaskromatografen, d.v.s. i vilken ordning ämnena når fram till detektorn. När man använder den vanligaste typen av detektor (flamjonisationsdetektor, FID) kommer man sedan inte så mycket längre. Om man däremot leder gas-



Figur 14. Emissionsmätning med FLEC på massivträ.
Foto: SP-Träteknik.

strömmen in i en masspektrometer (MS) vinner man ytterligare en typ av information. I masspektrometern splittras varje ämne av en elektronstråle och ger upphov till ett mönster av fragment som i bästa fall är så karaktäristiskt att det utan tvivel räcker för identifiering. Många närbesläktade ämnen kan ge mycket likartade masspektra. I praktiken får man därför ofta bara delvis överensstämmelse med de spektra som lagrats i en stor databas, och man kan då få nöja sig med att fastslå till vilken grupp av ämnen det hör.

Det finns begränsningar i ovan nämnda analys-teknik (Tenax-GC/MS). Alltför svårflyktiga ämnen kommer aldrig att passera igenom systemet, men av naturliga skäl behöver man inte heller räkna med att de avges i någon mängd av betydelse. Alltför lättflyktiga ämnen, däremot, kan inte adsorberas effektivt på provuppsamlaren och undgår på så sätt analysen. Det finns också en rad olika slags kortlivade och reaktiva föreningar, bland annat en del av dem som uppstår vid oxidation av ytan. Här är problemet snarast att de inte ligger kvar i oförändrad form i provtagar-röret, utan omvandlas till annat genom reaktioner med omgivningen. Formaldehyd är ett av de mest välkända exemplen på en förening som både är reaktiv och mycket lättflyktig. Här måste andra och mer specialiserade provtagare användas.

Formaldehyd och acetaldehyd samlas på filter som impregnerats med en reagens (DNPH, eller dinitrofenylhydrazin) som omvandlar dessa någorlunda reaktiva föreningar till stabilare sådana. Efter ursköljning med ett lösningsmedel analyseras sedan dessa föreningar med vätskekromatografi.

Den tredje gruppen av föreningar som har specialstuderats inom detta projekt är de organiska syrorna, eller karboxylsyrorna, för att uttrycka saken lite mera precist. Ättiksyra, som har två kolatomer, kan bestämmas med GC-MS-teknik, men en mera direkt metod ger pålitligare resultat. Syror med 3–8 kolatomer fungerar bra med den konventionella tekniken medan den allra minsta, myrsyra, kräver en annan provtagningsmetod. Luftströmmen från FLEC leds helt enkelt genom ett långt rör som på insidan belagts med en alkalisk fas. Syrorna fastnar på ytan som salter och kan sedan analyseras med jonkromatografi.

Resultat från emissionsprovningar på massivträ

Samtliga träprover hade konditionerats så att deras fuktkvot motsvarar vad man normalt får vid inköp

av torkat snickerivirke. Dessutom var de exponerade provytorna nyhyvlade, vilket är en faktor av största betydelse. Som tidigare har nämnts är nämligen för-råden av flyktiga föreningar oerhört stora i förhållande till vad som avges (ett talande exempel är när man sågar i en tvåhundraårig takbjälke av furu och får fram en yta som doftar som färsk). Dessutom kommer en stark nybildning av vissa ämnen att ske under inverkan av luftens syre.

Mätningarna genomfördes en månad efter prov-förberedelsen, med en uppföljning fem månader senare. I mellanperioden har proverna förvarats under ett kontrollerat klimat och i renad luft för att undvika nedsmittning från andra emissionskällor. Det skulle krävas mätningar vid ytterligare flera tidpunkter för att man skulle kunna uttala sig om hur de tidiga, starka emissionerna avklingar och vilken stabil nivå de så småningom svänger in emot. Två tidpunkter är ändå tillräckligt för att ge en ungefärlig uppfattning om en någorlunda ny träyta, så ny som man rimligen kan uppnå genom inköp från trävaruhandels vanliga sortiment, och dessutom något om dess förändring under det första halvåret. Dessa mätningar täcker på så sätt in emissionsegenskaperna under en tid som kan vara relevant för en temporär utställning.

Som nämnts redan i inledningen uttrycks emis-sionen i en areaspecifik avgivningshastighet med enheten $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ (mikrogram per kvadratmeter och timme). Genomgående gäller att alla materialprov-ningar har utförts med dubbla materialprov, men värdena ska ses som indikationer, då det inte räcker med ett par prov för att få ett allmängiltigt genomsnitt för ett visst träslag. Och även om man skulle kunna få fram, låt säga ett riksgenomsnitt, är den naturliga variationen så stor att varje ny införskaffad bräda skulle kunna avvika ganska långt därifrån. Analysen har visat värden efter en respektive sex månader (se tabell 4 och 5).

Förutom terpener, som särredovisas då de är starkt dominerande i avgivningen från barrved, redovisas särskilt två speciella ämnesgrupper: Aldehyder och syror. De senare är korrosiva och har en självklar betydelse i sammanhanget, vilket diskuteras vidare i ett senare avsnitt. Aldehyderna är den första reaktionsprodukten då t.ex. fetter oxideras i ytskiktet. De har en viss reaktivitet och kan bland annat verka irriterande på andningsvägarna hos människor, men de kan också oxideras vidare till just syror. De som sammanfattas i tabell 4 är enbart aldehyder med 3–12 kolatomer, medan de två minsta molekylerna ses i

Tabell 4. Areaspecifika emissioner ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) av flyktiga ämnen från nio träslag efter en respektive sex månader, uppmätta med GC/MS-teknik.

Ämnesgrupper	Al	Asp	Ask	Björk	Bok	Ek	Furukärna	Furusplint	Gran
En månad									
Aldehyder	32	159	5	70	4	0,3	60	383	6
Syror	8	33	8	24	12	8	20	39	5
Terpener							4406	859	11
Totalemission	47	209	19	140	20	26	4550	1381	30
Sex månader									
Aldehyder	23	43	4	17	2	1	54	672	12
Syror	4	21	3	31	6	14	48	169	25
Terpener							2452	105	7
Totalemission	33	75	12	66	13	33	2608	1130	50

Tabell 5. Areaspecifika emissioner ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) av små aldehyder och syror från nio träslag efter en respektive sex månader, uppmätta med vätskekromatografi och jonkromatografi.

Ämnen	Al	Asp	Ask	Björk	Bok	Ek	Furukärna	Furusplint	Gran
En månad									
Acetaldehyd	<8	<10	<8	<4	<6	<7	32	20	<5
Formaldehyd	5	10	6	6	<6	<7	<6	6	5
Ättiksyra	40	53	40	362	71	318	22	15	11
Myrsyra	14	33	11	61	10	31	52	135	30
Sex månader									
Acetaldehyd	6	<6	5	<5	10	9	7	24	<6
Formaldehyd	6	<6	6	<5	<6	<5	<5	7	<6
Ättiksyra	8	25	17	179	71	258	20	25	7
Myrsyra	0	10	0	21	2	15	43	159	50

tabell 5. Värdet för totalemission är summan av alla de ämnen som spårats i analysen.

Tabellen visar att furumaterialet står i särklass vad gäller den totala emissionen. Det beror främst på terpenerna, de ämnen som utgör innehållet i en flaska terpentint och som vi omedelbart på doften förknippar med barrträ. Kärnveden avger här flera gånger större mängder än splintveden, och de avklingar långsammare. Undersökningens granmaterial har en oväntat låg terpenavgivning. I flera andra fall har betydligt högre nivåer konstaterats från gran.

Det kan inte understrykas tydligt nog att ett urval av ett fåtal prover av det här slaget aldrig kan bli representativa för ett helt träslag. Det är känt att man med samma undersökningsmetod kan finna furu med terpenemissioner som skiljer sig 10–20 gånger i källstyrka. Sannolikt gäller det också många lövträslag, men där är det mera tunnsått med tillgängliga uppgifter i litteraturen.

Lögonfallande höga nivåer syns här i emissionerna av aldehyder och syror från furu, framför allt från splintveden. Det skulle dock krävas en kraftigt utvidgad undersökning för att svara på hur vanligt förekommande det är med så höga nivåer som

här. Man ser också en tydlig tendens till att mera aldehyder och syror avges från barrveden efter sex månader än vid den första mättidpunkten. I många materialundersökningar är det vanligt att just dessa föreningar når sitt maximum efter en viss tid, medan övriga VOC uppvisar en mer eller mindre avklingande kurva redan från början.

Bland lövträslagen förefaller asp och björk att avge mera aldehyder och syror än de övriga. Då är ändå björkens emissioner betydligt måttligare i detta fall än i en tidigare studie [1], då nivåerna av hexanal och pentanal var cirka tio gånger högre och dessutom endast mycket långsamt avklingande.

Ättiksyra är inräknat i de siffror som ges i tabell 4. Bedömningen av emissionen av ättiksyra bör dock helst grundas på den mera specifika metoden som använts för just ättiksyra och myrsyra. De kortaste aldehyderna och syrorna, med bara 1–2 kolatomer, har där givit följande resultat (areaspecifik avgivningshastighet som ovan):

Formaldehydemissionerna ligger över hela linjen på mycket låga nivåer, som överensstämmer väl med andra publicerade värden. På grund av sina speciella hälsoeffekter har formaldehyd studerats i mycket stor

Tabell 6. Översikt över provade skivmaterial.

Producent/Leverantör	Producentens beteckning	Skivtyp	Beteckning vid provning	Tjocklek (mm)	Densitet (kg/m ³)
Masonite AB	Hård board	Hård board	MAS	10	950
Schauman Oy	WISA	Björkplywood	BPL	15	620
Karlit AB	Duopanel	Hård board	HDB	6	1070
Karlit AB	Soft Board Ivory	Porös board	SFT	12	286
Karlit AB	MDF standard	MDF	MDF	16	762
Finnforest Sverige AB	Blockplatta AL-I/II-Int	Granlamell skiva, alfanér	ALF	16 fanér 2	485
Plyfa Plywood AB	Furuplywood B/X	Furuplywood	FPL	11	542
Byggelit AB	Byggelit Storuman	Spånskiva	SPN	15	643

omfattning, medan acetaldehyd inte har fått bråkdelen så mycket uppmärksamhet. Bakgrunden av data är där mycket svagare. Enligt denna studie verkar nivåerna vara ungefär lika låga, med undantag för furu.

Ättiksyra avges i de största mängderna från björk och ek, och det är en envis och kvarvarande emission (som man f.ö. lätt spårar genom att lukta på en bit ek). Myrsyra avges från lövträ i lägre grad, men emissionerna från barrveden är ganska markanta.

Resultat från emissionsmätningar på träbaserade skivor

Skivmaterial används för monterbygge och annan inredning, både som bärande element och som ytskikt. Ett representativt urval gjordes av de mest intressanta och mest använda kommersiellt tillgängliga typerna, se tabell 6. En strävan var också att täcka in ett spann av olika tekniska och utseendemässiga egenskaper. De har studerats på samma sätt som beskrivits ovan för massivträ. Det finns en skillnad vad gäller mättidpunkterna, då bara de små aldehyderna och syrorna mättes efter sex månader. I övrigt lades tonvikten vid tidiga mätningar, som skedde efter tre dagar respektive en månad. Här har dock ingen bearbetning av ytorna skett. Skivorna har levererats i lufttäta emballage nyproducerade direkt från fabrik, så snart efter produktionsdatum som möjligt. Skivornas ålder vid ankomsten till provningslaboratoriet motsvarar med andra ord en absolut kortaste tid som kan förflyta fram till försäljning. Från uppackning och provförberedelse har sedan tiden räknats innan mätningarna skedde.

Samtliga skivor levererades med en fuktkvot på 6–10 %, vilket ungefär överensstämmer med den fuktkvot de får i normal inomhusmiljö.

Resultaten av VOC-analysen visar i tabell 7 hur MDF-skivan har den lägsta totalemissionen som ny, men efter en månad har även emissionerna från den

porösa träfiberskivan och den hårda boarden sjunkit till jämförbara nivåer. Både björkplywooden och spånskivan visar högre värden efter en månad, och ökningen beror på stigande nivåer av både aldehyder och syror. Björkplywooden stämmer väl överens med den massiva björken vad gäller aldehyder och syror.

Tabell 7. Areaspecifika emissioner ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) av flyktiga ämnen från träbaserade skivmaterial efter tre respektive 30 dagar, uppmätta med GC/MS-teknik.

Ämnen	MAS	BPL	HDB	SFT	MDF	ALF	FPL	SPN
Tre dagar								
Aldehyder C ₃ –C ₁₂	13	71	29	26	6	161	134	675
Syror C ₂ –C ₈	41	13	61	37	10	22	15	84
Terpener	6	2	1	3	14	522	669	262
Totalemission	166	171	194	131	57	795	897	1328
En månad								
Aldehyder C ₃ –C ₁₂	8	150	23	26	11	109	146	873
Syror C ₂ –C ₈	19	47	46	7	20	19	17	147
Terpener	0	2	0	1	5	136	432	210
Totalemission	90	283	127	57	66	323	680	1603



Figur 15. Kärnved och splintved i furu. Foto: SP-Träteknik.



Figur 16. Studerade skivmaterial. Foto: Gabriel Hildebrand, RAÄ.

Däremot avviker den alfanérade skivan rejält från det rena alvirket, och då måste man komma ihåg att huvuddelen av skivan trots allt består av gran, som bidrar med både terpenener och andra emissioner.

Bland aldehyderna är det som regel hexanal som är den dominerande, vilket har sin naturliga förklaring i hur förekommande fettsyror bryts ner av luftens påverkan. På samma sätt är ofta hexansyra den vanligaste av syrorna men konkurrerar med ättiksyran om förstaplatsen. Butanal och pentanal är någorlunda framträdande hos några av materialen.

Förutom de tre ämnesgrupper som sammanfattats i tabellen har ett antal föreningar av skiftande karaktär påträffats. Det är i allmänhet frågan om mycket små mängder av kolväten, alkoholer och annat. I de allra flesta fall finns ingen som helst anledning att bekymra sig särskilt mycket över dessa. Det kan ändå vara intressant att notera att de två hårdboardskivorna avslöjar sitt släktskap genom att det i båda dyker upp förhöjda halter av furfural, en nedbrytningsprodukt som uppstår vid behandling av ved vid temperaturer över cirka 160–180 grader.

Återigen ska C_1 - C_2 aldehyder och syror värderas utifrån de separata analyserna i tabell 8. I undersökningarna av massivträ utfördes inga så tidiga mätningar som efter tre dagar, men tidpunkten en månad är gemensam för jämförelser. MAS och HDB, som båda är tillverkade med en våt process där fibrerna utsätts för höga temperaturer under förhållandevis långa tider under både skivformning och uthärdning. Möjligen är detta en orsak till att hårdboarden har den största avgivningen av myrsyra, som kan uppstå ur lignin och hemicellulosa genom olika hydrolysisprocesser. Förvisso passerar både spånskivor, plywood och annan board heta steg under limningen, men det är kortare uppehållstider och i regel lite lägre temperaturer. Hårdboardens ledande position som källa för myrsyra är odiskutabel när skivorna är färska, men efter ett antal månaders avklingning har skillnaderna till stor del utjämnats.

Det är rimligt att tänka sig att ättiksyra kan frisättas vid något lägre temperaturer. Det behövs bara att en esterbindning bryts i vissa acetylgrupper på hemicellulosan. Spånskiva och MDF avger, jämte den hårda boarden, mest ättiksyra efter en månad. Efter ett halvår har dock alla halter sjunkit till mycket måttliga nivåer. Björkplywooden utgör ett undantag som faktiskt ökar i perioden före den sista mätningen.

Tabell 8. Areaspecifika emissioner ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) av små aldehyder och syror från träbaserade skivmaterial efter tre respektive 30 dagar, uppmätta med vätskekromatografi och jonkromatografi.

Ämnen	MAS	BPL	HDB	SFT	MDF	ALF	FPL	SPN
Tre dagar								
Acetaldehyd	8	58	59	<5	6	38	32	125
Formaldehyd	27	17	51	15	58	57	<6	88
Ättiksyra	188	43	292	46	117	25	22	242
Myrsyra	314	12	604	18	47	17	52	50
En månad								
Acetaldehyd	5	15	5	5	<5	15	7	36
Formaldehyd	10	6	26	9	42	17	<5	59
Ättiksyra	94	25	153	1	69	8	20	138
Myrsyra	160	8	263	14	27	8	43	27
Sex månader								
Acetaldehyd	<4	9	<7	<7	<5	<5	28	6
Formaldehyd	<4	<4	<7	<7	26	9	7	30
Ättiksyra	23	60	13	3	22	1	19	51
Myrsyra	49	2	21	5	11	2	18	16

Det kanske inte är välbetänkt att upprätta en absolut rangordning mellan olika skivor på grundval enbart av dessa data, men skillnaderna är här markanta. Allmänt förefaller den porösa träfiberskivan SFT och den alfanérade granlamellskivan ALF vara de mest skonsamma för omgivningen, om man bara ser till avgivningen av de här kortaste syrorna. Tar man också hänsyn till syror med tre kolatomer eller fler blir det hela lite mera svårtolkat.

Resultat från emissionsprovningar på utvalda lacker och färger

Diskuterar man emissioner från byggnads- och inredningsaktiviteter är det självfallet omöjligt att ignorera färger och lacker. De är flytande produkter som stryks ut i tunna skikt och medan färgen torkar ingår sedan just emission som en väsentlig, ja till och med avgörande, grundprincip! Huvudsakligen är det antingen vatten eller organiska lösningsmedel som svarar för den största delen av avdunstningen från en nybildad färgfilm, men därutöver förekommer en lång rad andra typer av föreningar. Speciellt är många av de vattenburna färgerna ganska komplexa formuleringar. Det ingår t.ex. olika hjälplosningsmedel som kan behövas vid inblandningen av pigment och fyllmaterial, andra tillsatser har till uppgift att reglera viskositet och avdunstningshastighet från den våta färgen, mycket viktigt för filmbildningen. De

egentliga lösningsmedlen försvinner ganska fort då färgfilmen torkar, men bland övriga innehållsämnen finns många som är ganska svärflyktiga och kommer att avges under mycket lång tid, i månader och år.

Praktiskt taget alla av de utvalda produkterna som sammanfattats i tabell 9 var vattenburna. Undantag var linoljefärgen, som har en hög torrhalt men innehåller en viss del alifatnafta. Urvalet är gjort för att få fram en skara av färger med utsträckt användning, men som samtidigt täcker ett spann av olika typer.

Det finns anledning att påminna om att färgbranschens produkter är föremål för ständig utveckling. V-Mill och Milltex finns kvar i Alcro-Beckers sortiment, men recepturen är idag inte identisk med vad den var då undersökningen genomfördes. Innehållet av flyktiga ämnen har minskats, och de är nu även märkta enligt Svanen. Bell Sidenmatt motsvaras idag av Sober Matt Täckfärg Vägg, som uppfyller kriterierna för alla de tre märkningsordningarna. Klarlacken heter numera bara Trälack, och saknar miljömärkning då märkningskriterierna bara omfattar täckfärger. Färgerna från Engwall & Claesson heter nu Interiör V, Linoljefärg Matt Invändig och Ceo Matt Emulsionsfärg Invändig, men de är i princip oförändrade. Företaget har valt att inte miljömärka sina produkter. Färgen från Rosco är sannolikt oförändrad. Information om eventuell märkning saknas.

Färgerna har provats efter uppstrykning på glas, vilket är en delvis orealistisk förutsättning. Fördelen är att man renodlar färgproduktens egna emissioner, men i praktiken är den behandlade ytan i större eller mindre utsträckning sugande. En starkt sugande yta påverkar filmbildningen, i värsta fall mycket negativt, genom att en del av färgens komponenter försvinner in i underlaget. Det kommer också att innebära att

en del av de tidiga emissionerna undviks, men ofta också att de föreningar som först sugits in i underlaget emitteras senare, med lång fördröjning.

Som i undersökningen av skivmaterial utfördes här mätningar efter kort tid, i detta fall redan då färgfilmerna var två dygn gamla och knappt torkade, därefter vid åtta dygn och 28 dygn. Den andra mätningen motsvarar en tidpunkt då de allra största VOC-emissionerna har skett, och serien avslutas med ett senare skede som motsvarar förhållandena efter en kort tids bruk. Vid den sista tidpunkten finns VOC-data, men i övrigt bara en syramätning för färg 6.

Linoljefärgen 6 avviker från övriga färger genom sin oerhört kraftiga avgivning av aldehyder och syror i tidiga skeden, inklusive formaldehyd och myrsyra. Det blev nödvändigt att lägga till en syramätning för denna färg efter 28 dygn, då annars bara VOC ingick i planen. Den feta alkydemulsionsfärgen 5 avger också försvarliga mängder av längre syror och aldehyder, men här verkar avgivningen kulminera något senare. Självfallet vore det intressant att följa vissa av dessa ytbehandlingar under en längre tid och fylla på med kompletterande kunskap.

De summerade mängderna är stora bara för ett fåtal färger, och de avtar sedan hastigt. Några av behandlingarna uppvisar närmast förbluffande låga emissionsvärden redan som helt färska. Enskilda substanser dominerar ibland bilden tydligt, som till exempel Texanol i klarlacken 2 och i färg 8. Det kan också vara en handfull alkoholer och glykoler (samt glykolernas etrar och estrar) som utgör den största delen av VOC, som fallet är för färgerna 1, 3, 4 och 5.

I en uppföljning av emissionsmätningarna på färger på glas företogs också några försök där ett par ytbehandlingar ströks på mera realistiska underlag.

Tabell 9. Översikt över undersökta färger och lacker.

Löpnr	Produktnamn 1	Typ	Producent	Miljömärkt 1	Våt skikt-tjocklek (µm)
1	V-Mill	Akrylatlack för snickerier	Alcro-Beckers	EU ²	95
2	Trälack Aqua Blank	Klarlack, akrylat/polyuretan	Alcro-Beckers		108
3	Bell Sidenmatt	Latex (sampolymer-emulsion), för vägg	Alcro-Beckers	EU ² AA ³	100
4	Milltex Matt 7	Latex (sampolymer-emulsion), för vägg	Alcro-Beckers	EU ² AA ³	100
5	Väggalkyd V	Fet alkydemulsion (vattenburen) för vägg	Engwall & Claesson		100
6	Äkta Linoljefärg Matt	Traditionell linoljefärg, för vägg och tak	Engwall & Claesson		106
7	Äkta emulsionsfärg	Traditionell emulsionsfärg (linolja/vatten) för vägg	Engwall & Claesson		108
8	Supersaturated Paint	Akrylat, co-polymer	Rosco		87

1 De produktnamn som ges här, och de uppgifter om förekommande miljömärkning är de som gällde år 2003.

2 EU-blomman

3 Astma- och allergiförbundets märkning

Tabell 10. Areaspecifika emissionsfaktorer ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) för färgproverna 1–8 på glas: Summa alifatiska aldehyder $\text{C}_3\text{--}\text{C}_{12}$, summa alifatiska karboxylsyror $\text{C}_2\text{--}\text{C}_8$ och Summa VOC, analyserat med GC-MS-teknik. Korta ($\text{C}_1\text{--}\text{C}_2$) aldehyder och syror med HPLC resp. jonkromatografi.

Ämnen	1	2	3	4	5	6	7	8
Två dygn								
Aldehyder (VOC)	40	2	4	3	18	2458	1	5
Syror (VOC)	20	91	16	21	187	651	4	6
Summa VOC	2555	8635	111	225	707	5170	30	367
Acetaldehyd	–	<19	<20	<20	<18	24	<20	<20
Formaldehyd	–	<19	<20	<20	<18	250	<20	<20
Ättiksyra	16	3	140	288	13	1	6	11
Myrsyra	6	5	21	3	5	4237	2	5
Åtta dygn								
Aldehyder (VOC)	1	3	1	1	1023	13	1	4
Syror (VOC)	6	3	5	3	97	199	8	16
Summa VOC	92	2663	46	35	1335	1701	21	39
Acetaldehyd	<19	<19	<17	<17	<20	<20	<20	<20
Formaldehyd	<19	<19	<17	<17	26	85	<20	<20
Ättiksyra	11	10	13	74	12	172	5	2
Myrsyra	14	4	11	1	60	1268	0	12
28 dygn								
Aldehyder (VOC)	0	1	1	1	88	12	3	2
Syror (VOC)	0	1	1	0	31	50	7	9
Summa VOC	44	353	16	30	160	260	43	39
Ättiksyra						28		
Myrsyra						186		

Tre av de utvalda färgerna hade redan provats på inert underlag, och nu ströks Milltex och Rosco (färg 4 och 8) på MDF och Trälack Aqua (färg 2) på massiv björk. Dessa lades på med kontrollerad filmtjocklek, men i endast ett skikt. Ytterligare en lackfärg tillkom: Cempurlack, som i museimiljö har ett rykte om sig att vara tät och därför är populär och vanligt förekommande. Den applicerades på alfanerad

Tabell 11. Areaspecifika emissionsfaktorer ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) för några av färgproverna på träunderlag: Summa alifatiska aldehyder $\text{C}_3\text{--}\text{C}_{12}$, summa alifatiska karboxylsyror $\text{C}_2\text{--}\text{C}_8$ och Summa VOC, analyserat med GC-MS-teknik. Korta ($\text{C}_1\text{--}\text{C}_2$) aldehyder och syror med HPLC resp. jonkromatografi.

Ämnen	Färg eller lack nr				
	2	4	8	C	C+4
Tre dygn					
Aldehyder (VOC)	456	1	6	15	17
Syror (VOC)	277	20	36	14	31
Summa VOC	8830	64	569	1295	396
Acetaldehyd	<8	<8	<8	9	11
Formaldehyd	6	17	34	9	7
Ättiksyra	238	59	156	103	90
Myrsyra	189	17	14	8	11

lamellskiva som två skikt med tre dagars mellanrum (betecknat med C i tabellen). Slutligen utfördes på samma slags lamellskiva en systemmålning som också är ett tänkbart scenario: Två gånger Cempurlack, följt av ett skikt Milltex tre veckor senare (C + 4).

I den här undersökningsetappen finns bara en mätpunkt, i samtliga fall tre dagar efter uppstrykning av färgerna. Naturligtvis har de finansiella resurserna varit en orsak till denna begränsning som inneburit att tidsserie fått väljas bort som alternativ. En annan rationell bakgrund är dock att försöken ville efterlikna den situation som uppstår då en utställning byggs färdigt bara ett par dagar innan den tas i bruk. Det är antagligen en mycket vanligt förekommande situation, som här beskrivs genom en blixtbelysning av emissionerna vid en tidpunkt. Därutöver finns möjligheter att göra intressanta jämförelser när tidigare undersökta ytbehandlingar och material kombineras.

Resultaten, som sammanfattas i tabell 11, kan jämföras med tre-dygnsvärden för MDF och lamellskiva och med två-dygnsvärden för de tidigare provade lackerna.

Lack 2 uppvisar dramatiskt höjda emissioner av lite längre aldehyder och av hela spannet av syror. Jämfört med samma lack på glas avges här mellan 3 och 200 gånger större mängder av dessa ämnesgrupper. Det blir därför naturligt att söka ursprunget till dessa ämnen någon annanstans än i själva lacken, och björk hör till de träslag som kan avge betydande mängder av aldehyder och syror. Det är också sannolikt att emissionerna från björk förstärks ganska plötsligt då vatten från den nya lacken tränger in. Det påminner om fenomenet att torra blommor och blad börjar dofta när de fuktas av dagg, och det är också känt att formaldehydavgivning från skivor påverkas starkt av fuktnivån. Alternativt skulle ökningen kunna beskrivas så att vattentillförseln ger en miljö som gynnar en spjälkning av en del bindningar i träfibrernas långa molekyllängder, och att det alltså sker en nybildning. Dessa förklaringar har en allvarlig brist: De övriga fyra systemen tillför också vatten, visserligen till två andra underlag, som då inte blir direkt jämförbara, men det är ändå huvudsakligen trä. Och de ger inte alls samma stora ökning! Ett högre pH-värde skulle hypotetiskt kunna accelerera emissionerna, men det går inte att se att lack 2 skulle vara väsentligt annorlunda i det avseendet. Lack 2 har här inte heller någon av ökning av formaldehyd och den har förvånansvärt oförändrad summahalt av VOC.

Milltex (färg 4) har lägre emissioner här än på glas. Det betyder att vattnet i färgen inte provocerar fram några större emissioner från MDF-skivan, men i stället förfaller en del av komponenterna ha absorberats i underlaget. Å andra sidan visar färg 8 det omvända beteendet, då den nu ger betydligt högre emissioner, både totalt och av syrorna. Detta understryker svårigheterna att generalisera utifrån begränsad information.

Cempurlack har inte provats tidigare, och det går inte ur dessa data att se hur diffusionstät färgfilmen blir efter längre härdning. Här släpper den i alla fall tydligt igenom en del terpenener, som annars varit i stort sett frånvarande i övriga prov. Terpenerna har sitt ursprung i det barrvedsvirke som utgör skivans kärna under alfanéret. Slutstrykningen med ett skikt Milltex har av allt att döma isolerat den underliggande färgen i stor utsträckning och reducerat korttidsemissionen till mindre än en tredjedel.

Referenser

- Ahlbom, J., Duus, U. & Freilich, D. 1996. En nyans grönare, Rapport 2/96, Kemikalieinspektionen.
- An, Y., Zhang, J.S. & Shaw, C.Y. 1999. Measurements of VOC adsorption/desorption characteristics of typical interior building material surfaces. *International Journal of HVAC and R Research*, 5.
- Berglund, B., Johansson, I. & Lindvall, T. 1988. Adsorption and desorption of organic compounds in indoor materials. *Proceedings of Healthy Buildings '88* (eds. B. Berglund, T. Lindvall), vol. 3. Svenska Byggforskningsrådet, Stockholm.
- Cain, W.S., Schmidt, R., Leaderer, B.P., Gent, J.F., Bell, D. & Berglund, L.G. (2002). Emission of VOCs from materials used in buildings: analytical and sensory aspects. *ASHRAE transactions*, 180.
- Endt, D.W., von Erhardt, W.D. & Hopwood, W.R. 1995. Evaluating materials used for constructing storage cases. *Storage of Natural History Collections*. Vol. 1, SPNHC, Dep. of Geology, University of Iowa.
- Englund, F. 1999. Emissions of volatile organic compounds (VOC) from wood. Report I 9901001, Trätek, Stockholm.
- Fjällström, P. 2003. Chemical aspects of ecological paints. Doktorsavhandling, Umeå universitet.
- Granström, K. 2005. Emissions of volatile organic compounds from wood. Doktorsavhandling, Karlstad university studies 2005:6.
- Huang, H., Haghighat, F. & Blondeau, P. 2006. Volatile organic compound (VOC) adsorption on material: influence of gas phase concentration, relative humidity and VOC type. *Indoor Air*.
- Jørgensen, R.B. & Bjørseth, O. 1999. Sorptive behavior of VOCs on material surfaces – the influence of combinations of compounds and materials compared to sorption of single compounds on single materials. *Environment International*.
- Lee, C.-S., Haghighat, F. & Ghaly, W.S. (2005). A study on VOC source and sink behavior in porous building materials – analytical model development and assessment. *Indoor Air*, 15.
- Rance, V. E., & Cole, H. G. 1958. Corrosion of metals by vapours from organic materials. *Inter-service Metallurgical Research Council*, her Majesty's Stationery Office, London.
- Ryhl-Svendsen, M. 2000. Indoor Air Pollution in Museums. Master Thesis, School of Conservation, The Royal Danish Academy of Fine Arts.
- Schieweck, A. & Salthammer, T. 2009. Emissions from Construction and Decoration Materials for Museum Showcases. *Studies in Conservation*.
- Singer, B.C., Revzan, K.L., Hotchi, T., Hodgson, A.T. & Brown, N.J. 2004. Sorption of organic gases in a furnished room. *Atmospheric Environment*.
- Wolkoff, P. 1999. How to measure and evaluate volatile organic compound emissions from building products. A perspective. *Science of the Total Environment*.
- Wolkoff, P., Wilkins, C.K., Clausen, P.A. & Nielsen, G.D. 2006. Organic compounds in office environments – sensory irritation, odor, measurements and the role of reactive chemistry. *Indoor Air*.

Riskbedömning och åtgärder (luftföroreningar)

Av Monika Fjaestad, RAÄ

Risker för kulturarvet kan ha olika storleksgrad – stor eller liten skada, snabb eller långvarig verkan. Den skada vi inte kan förutse eller hindra i en övermäktig situation kallar vi katastrof eller force majeure. Det rör sig om ovanliga naturolyckor och krigssituationer. Vissa fenomen kan vi förutse som risker för t.ex. brand, höga vattenflöden, blixtnedslag och extremklimat m.m. Då kan vi vidta förebyggande åtgärder. Med erfarenhet från flera hundra år beräknas belastningar för extrema situationer vid t.ex. husbyggen. Man kan förebygga skador på hus, interiörer och inventarier. Utan kunskapsöverföring mellan generationer och vetenskapsområden kan resultatet bli förödande. Okunskap och försummelse är tyvärr mänskliga egenskaper som kan leda till omedveten förstörelse. Inom kulturarvsområdet finns kunskap om bevarandet och därmed medvetenhet om risker.

Skaderisker på längre sikt, som vid nedbrytning av kulturobjektens material, är inte lika uppenbara. De innebär inte en totalförstörelse och kan inte upptäckas på kort sikt. Det är främst ytor som förändras vid korrosion. Oftast är det dock på ytan som den betydelsebärande informationen finns. Formen är skapad för sin funktion men på ytan finns ornamenten och de konstnärliga uttrycken. Förändringar kan ske genom klimatskador som förstör både form och betydelsebärande skikt. Skadorna kan delas in i fysisk, kemisk och biologisk nedbrytning även om det ofta rör sig om en kombination av nedbrytningsprocesser.

Kemisk nedbrytning

När det gäller luftföroreningar veckar de nedbrytande främst genom kemiska processer. Dessa har beskrivits i tidigare kapitel. Det som kännetecknar dessa processer är att de verkar under lång tid och att föroreningarna ackumuleras på eller i materialet. Flera föroreningar tillsammans kan ge accelererade negativa synergieffekter. Organiska syror, som vi främst har fokuserat på i denna studie, ökar korrosionshastigheten på många metaller. De bildar salter

i kalkhaltiga stenmaterial, glas, keramiska föremål. När det gäller organiska material som textilt fibrer, läder och papper påskyndas hydrolys samt oxidation och fibrerna försvagas.

Förvaltning av kulturarv

Luftföroreningar är inte den största akuta risken för kulturarvet men det är en osynlig risk som ofta försummas. Förvaltare av kulturföremål bör ställa sig vissa frågor.

- Är stöld- och brandskydd gott nog för de värden som ska skyddas?
- Är ljusförhållande och inomhusklimatet under kontroll för de värden som ska skyddas?
- Är luften ren från avgaser?
- Är de montrar och skåp där föremål förvaras byggda av lämpliga neutrala material?

För att besvara dessa frågor tar förvaltaren ofta in byggnadsexperter som utför mätningar och gör

Tabell 12. Skaderisker för kulturföremål.

Total förlust av samling eller föremål	
Orsak	Åtgärder
Krig	FN, evakuering
Brand	Sprinkler, larm, m.m.
Stöld, vandalism	Stöldsäkerhet, bevakning, larm, m.m.
Oaktsamhet, oordning	Undervisning, rutiner, ledarskap
Förlust av originalytor och formförändring	
Vatten	Dränering, tätning, inga vattenrör i lokalen
Fukt eller torka	Klimatisering
Ljus	Avskärmning, ändra armatur
Temperatur	Sänka eller höja uppvärmning
Mögel	Sänka luftfuktighet, sanering
Skadedjur	Fällor, sanering, frysning m.m. Samordnad skadedjurskontroll
Ökande förlust av betydelsebärande originalytor	
Luftföroreningar, utifrån	Filtersystem, täta fönster m.m.
Luftföroreningar, inifrån	Undvika emitterande material, kemfilter
Damm och partiklar	Dammsugning, mikrofilter
Lösliga salter, fingeravtryck	Undvika salter, skyddshandskar
Syror eller alkaliska ämnen	Undvikas

bedömningar. Många av dessa experter känner inte till de speciella krav som krävs för bevarande av antikvariska föremål. Det kan bli dyrt och kontraproduktivt. De normer som vanligen är rådande inom byggnadssektorn är avsedda för humankomfort och hälsa. Det är av stor vikt att en konservator kontaktas för att samordna undersökningen och sammanställa ett åtgärdsförslag.

Inom museisektorn är kunskapen om förebyggande konservering mer utbredd än inom det kyrkliga området. Kyrkoherden i varje församling är ansvarig för bevarandet av kyrkans inventarier. Det är länsstyrelsen som beslutar och ger tillstånd för lämpliga åtgärder.

Riskmiljöer

De inomhusmiljöer som har halter av organiska syror (myrsyra + ättiksyra) som är högre än utomhusluften kan klassas som riskmiljöer. På landsbygden är halterna i utomhusluften normalt mycket små. I denna studie, se s. 22, ser vi förändringar redan vid en halt av cirka 50 µg/m³. I figur 13 (se s. 24), ser vi att i urbana miljöer är halterna på nästa alla exponeringsplatser högre än detta värde. I trämontrar, träskåp och magasin med träinredning som ej avfuktas är halterna tämligen höga. Riskmiljöerna finner vi i fuktig miljö i träskåp eller träinredning som inte är ventilerade. I staden är belastningen högre av luftföroreningar och en miljö som inte är avfuktad och är inredd med träskåp har oftast höga halter som riskerar att öka nedbrytningen.

När behövs mätningar av emissioner?

På landsbygden behöver man i regel inte befara höga luftföroreningshalter i utomhusluften. I äldre hus på landet som inte nyligen renoverats är inomhusluften oftast tämligen ren, emissionerna är redan utvärdrade. Vedeldning är här den vanligaste föroreningskällan. Mätningar är här inte befogade om huset inte är fuktpåverkat.

Mätning av och kontroll av klimat är särskilt nödvändig i kyrkor och historiska hus med samlingar. Det man ska vara observant på är de skåp eller monttrar som föremålen förvaras i. Det bör finnas ventilationsspalter om skåpen är byggda av trä. Vid inköp av nya skåp eller montrar bör man tänka på att använda metall, glas eller ett trämaterial som emitterar låga

halter av syror. I fuktiga skåp och lådor ökar risken för emissioner och mögeltillväxt.

I museer i trafikerad stadsmiljö kan det vara befogat att utföra en mätning av föroreningshalter i inomhusluften. Det kan ske genom att använda passiva provsamlare som beskrivits i bilaga 3. De finns utformade för mätning av olika gaser. När det gäller svavelhalt så är exponering av silverkuponger det mest vanliga och tillförlitliga. Det är främst inredningsmaterial som emitterar organiska syror. Därför är det viktigt att gå igenom vilka skåp och montrar som finns och byta ut de som består av ett olämpligt material. Generellt så emitterar nya material mer än gamla. Det kan därför vara befogat att mäta luften i de gamla skåpen. Emissioner från en del skivmaterial avklingar inte lika fort som ett poröst träslag. Fuktig luft ökar emissionshastigheten. Därför är det viktigt med mätning och kontroll av klimatet.

När det gäller museimagasin är det befogat att vid tillfälle byta ut träskåp och hyllor mot plåt och glas. EU-pallar i gran och furu för större föremål i museimagasinen får vi leva med. Det är endast träföremål och icke kalkhaltig sten som passar riktigt bra på trähyllor.

Tillståndsbedömning

På Riksantikvarieämbetet har tillståndsbedömningar för inventarier och samlingar utförts under många år i kyrkor, museer och historiska hus. Vi har givit råd i ombyggnadsprocesser och nybyggnationer av magasin och varit delaktiga i länsstyrelsernas beslut om förvaring av metaller och textilier i kyrkor. Det är ett ständigt utvecklingsarbete som pågår.

Kyrkor

I kyrkorna finns antikvariskt värdefulla inventarier som ofta förvaras i sakristian när de inte används. Särskilda textilskåp har rekommenderats av RAÄ. Skåpen är många gånger tyvärr utförda i björk som tidigare ansetts som det bästa träslaget. Rekommendationen härstammar från TEFO (Textilforskningsinstitutet) som på 1990-talet på uppdrag av RAÄ gjorde undersökningar med foggning, en äldre metod som endast påvisade synlig mängd VOC. Björk avger mindre mängder VOC än andra träslag. Några mätningar av organiska syror gjorde man inte. Nu vet vi att björk emitterar stora mängder myr- och ättiksyra. Nya frågeställningar och metoder ger nya

resultat. Det är möjligt att dagens metoder och råd får omprövas om 20 år.

Kyrkliga textilier är ofta sammansatta av olika material som ull, siden, linne. Många är konstfullt broderade med metalltrådar eller lan. Dessa trådar består av guld, silver och ibland koppar. För att skydda textilier från föroreningar i skåpen används skyddstyg som tvättas med jämna mellanrum. Det finns stålskåp på marknaden med utdragbara lådor för stora liggande textilier.

Värdefulla silverföremål ställs ut i säkerhetsmontrar. Dessa är täta, brand- och stöldklassade och utförda i metall och glas. Det är sällan som olämpliga material ingår i konstruktionen. Metallföremål som inte används förvaras ofta i säkerhetsmonter, värdeskåp eller kassaskåp.

Museer

I museimagasin byter man ofta ut trähyllor till stål vid ombyggnation. I gamla magasin finns det fortfarande trähyllor och skåp i långa rader. För blandade sentida samlingar kan gamla, öppna furuhyllor accepteras eftersom de låga emissionerna troligen redan har vädrats ut. Det är värre med hyllor och skåp av ek, björk och spånskivor som är slutna och innehåller högre halter av organiska syror. Det är viktigt att ventilerat träskåpet och inte förvara känsliga föremål där, se figur 13, s. 24.

Arkeologiska samlingar med korroderade föremål förvaras oftast i träbackar av furu. Detta är ett modulsystem som initierats av Statens historiska museer. Det skulle vara svårt att få fram samma system med plåt- eller plastbackar. Det viktigaste för arkeologiska samlingar är att få ner luftfuktigheten genom avfuktning. Därigenom vädras också mycket av syrorna ut. Det samma gäller för blandade kulturhistoriska samlingar.

Textilskåp är vanligt förekommande i magasinerna. De är nästan alltid byggda av trä. Det finns dock stålskåp på marknaden med utdragbara lådor för stora liggande textilier.

Historiska hus

Slott, gårdar och torp äldre än 100 år som bevarats som museer till idag innehåller ofta inventarier från tiden de representerar. Om föremålen är ursprungliga från platsen har de med tiden aklimatiserats i sin miljö. Avdunstningar från materialen i skåp

och hyllor har för länge sedan vädrats ut. Dessa hus har ofta ett betydande självdrag genom fönster, golv och öppna spisar. De ligger oftast på landsbygden med ren luft runt huset. De skador som sker här är ofta förknippade med ljusblekning och med hög luftfuktighet som befrämjar skadedjur och mögel. En avfuktare är lämplig i dessa miljöer. Vid renoveringar i interiören kan linoljefärg vara en källa till korrosiva syror. Det tar flera månader innan färgen har härdnat och inte längre emitterar stora mängder syror. Under restaureringstiden är det viktigt att alla föremålen flyttats till ett bra klimatiserat förråd under renoveringen.

Åtgärder

Om man har observerat, uppmätt eller befarar skaderisk på grund av luftföroreningar inomhus så finns det flera vägar att välja. Åtgärderna bör anpassas efter varje problemställning.

Konsivering

När en samling eller föremål är skadat och förorenat behövs en konservering och rengöring. Textilier som förvarats i en sur miljö behöver rengöras och stabiliseras av konservator. Metaller som är angripna av korrosion bör även stabiliseras av konservator. Andra material som fotokopior, papper, läder, böcker kanske behöver skyddande omslag av syrafri papp eller papper. En konservator kan bedöma behov från fall till fall. Skyddslakan för textilier bör tvättas en gång om året.

Rengöring

Att avlägsna damm och partiklar genom regelbunden städning på golv och hyllor är en viktig rutin i närheten av föremålen. Regelbunden dammsugning med en dammsugare med mikrofilter är skonsamt.

Klimatkontroll

Fuktig luft ($\geq 60\%$ RF) innebär höga emissionshastigheter av organiska syror, VOC och risk för mögel och skadedjur. I ett museimagasin förekommer oftast klimatkontroll. I kyrkor och historiska hus är det ett undantag. I bästa fall finns det stöduppvärmning under vinterperioden. Huset följer luftfuktigheten utomhus med hög fuktighet under senvår, sommar och höst. En

avfuktare kan även användas på sommarhalvåret. Den är mer kostnads- och energieffektiv än underhålls- värme och har även en luftrenande funktion.

Luftrening

Kemiska filter finns för rening av luft. Det finns mobila och fasta system. Luftrening används bland annat i museimagasin, kontrollrum och i känsliga laboratorier. De mobila systemen kan med fördel användas i magasin där klimatet är passivt klimatiserat. Det är troligen mer kostsamt än avfuktning då filtren behöver bytas med vissa mellanrum.

Omplacering av föremål

Genom att kritiskt bedöma de magasin, förråd och skåp som står till buds kan man göra en omplacering. Mindre känsliga föremål kan ställas i gamla träskåp och man kan komplettera med ett nya eller begagnade stålskåp. Försvaret har sålt ut många stålhyllor och skåp från sina förråd till museer och andra.

Anpassning av skåp och montrar

Gamla skåp och montrar som är byggda av gran och furu kan vara användbara. Det beror på vad som ska förvaras där. Det går att isolera träet med lacker och plastfolier. Det är dock omständligt och krävande. De skåp man har kan göras bättre genom att ta upp ventileringspalter så inte luften blir stillastående. Detta gäller dock inte för montrar i utställning. De bör vara tätade och inte innehålla högemitterande

material. I dessa montrar kan man däremot använda absorber som aktivt kol eller ofärgad silicagel.

Inköp av nya skåp och hyllor

Vid en ombyggnation av magasin eller kyrka är det enklare att planera in nyinköp av hyllor och skåp. Det finns kompaktsystem och fasta hyllkomplex i stålkonstruktion. När det gäller textilskåp så finns det duktiga snickare som är specialiserade inom området.

Rekommenderad förvaring – risker med rekommendationer

De flesta material utom metaller och glas avger föroreningar i någon mån. Trä är ett material som vi har byggt hus, interiörer och möbler av sedan urminnes tider. Det är inte ohälsosamt för människor men det kan påverka andra material. I det tidigare kapitlet om *inredningsmaterialens korrosivitet* framkommer tydligt att mätresultatet är specifikt för just det virkesstycke som mätningarna har utförts på. Halterna beror på växtplats, miljöbetingelser och genetiska faktorer. Lagringstiden av trävaran är betydelsefull och om skivan eller virkesstycket har smittats av andra material ger tillsammans utslag i mätningar av t.ex. organiska syror. För att vara korrekt så borde trämaterial alltid mätas innan en monter eller skåp byggs. Detta skulle bli orimligt dyrt och tidskrävande.

Trävaruproducenterna mäter halter av emissioner på sina produkter och ger ut varuinformationsblad. Främsta fokus har legat på att mäta formaldehyd och VOC som kan ge allergier. Den standardise-

Tabell 13. Rekommenderad förvaring.

Material	Klimatiserat magasin	Kyrkor, historiska hus
Silver och förgyllt silver	Värdeskåp utan svavelhaltiga ämnen	Kassaskåp eller säkerhetsmonter, ej svavel
Järn, koppar, brons, mässing	Plåtskåp eller hyllor i värmt, avfuktat rum, syrafria askar	Plåtskåp eller skåp av al, gran eller alfanér
Tenn, bly, zink		Plåtskåp med underlägg av syrafri kartong
Bomull, linne, hampa känsligt	Plåtskåp med skyddstyg av urtvättad bomull	Ventilerat skåp av plåt eller al, alfanér, gran och kärnfuru. Lådbottnar av nät eller perforerad aluminium. Skyddstyg av urtvättad bomull
Siden, ull mindre känsligt för organiska syror		
Keramik, glas, emalj, kakel	Plåtskåp, hyllor av al eller gran	Ej ek- eller björkskåp
Träföremål, möbler	Öppna trähyllor av gran eller furu, EU-pallar	
Papper, fotokopior	Plåtdokumentskåp	Plåtdokumentskåp
Böcker	Öppna hyllor av al eller gran	Ej ek- eller björkhyllor
Läder, pergament	Plåtskåp eller hyllor	Ej ek- eller björkskåp
Fotonegativ	Eget "aktivt ventilerat plåtskåp"	Kallt och mörkt, låda av syrafri kartong
Sten, som granit, gnejs och andra icke kalkhaltiga bergarter	Vilka hyllor som helst	Vilka hyllor som helst
Kalkhaltig sten, marmor, sandsten, fossil, snäckor, pärlor	Plåtskåp, syrafria askar eller öppna hyllor av al, alfanér eller gran	Gärna plåtskåp eller öppna hyllor av neutralt trä

rade metod som används är FLEC®-metoden med TenaxTA® som adsorbent. Denna adsorbent fångar inte de minsta syrorna som myrsyra och ättiksyra. Det är därför svårt att få en uppfattning om dessa syror genom informationsbladen.

Det finns flera uppdaterade rekommendationslistor för bra och dåliga material som har spridits i museisektorn med ursprung från bl.a. Riksantikvarieämbetet. Dessa har för- och nackdelar. Produkterna och sortimentet förändras med tiden och det är svårt och kostsamt att hinna med att verkligen prova alla material. Vi har idag inte de resurserna.

Våra riktlinjer får ses som en fingervisning och grundar sig endast på de material som vi har undersökt i denna studie. Styrkeegenskaper, styvhet, hållfasthet, kostnad m.m. är naturligtvis egenskaper som måste vägas in vid materialval

Riktlinjer avseende myr- och ättiksyra

Aldehyder har inte tagits med i klassningen då de inte är korrosiva i sig men med tiden oxideras de till syror (Raycaudhuri & Brimblecombe 2000).

Träskivor

Mätningar av myr- och ättiksyraemissioner efter tre dygn, en månad och sex månader, värden i $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ (fig. 17), se tabell 8 (s. 33).

Träslag

Mätningar av myr- och ättiksyra emissioner efter en månad och sex månader, värden i $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$ (fig. 18), se tabell 5 (s. 30).

Färgbaser

Vi har endast testat några lacker och färgbaser på marknaden, det finns många fler. Färgämnen och kulörer ingår inte i testen. Det finns många tusen.

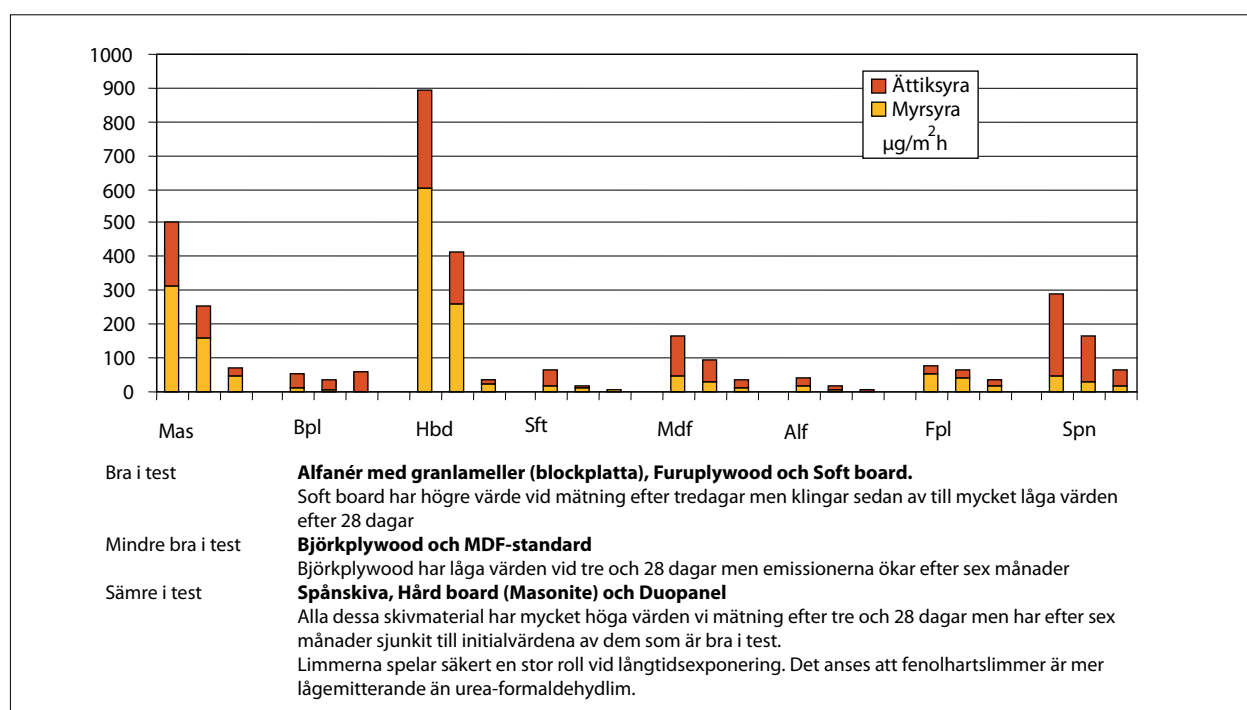
Test 1. Mätningar av myr- och ättiksyra emissioner efter två dygn och åtta dygn (fig. 19), värden i $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$, se tabell 10 (s. 35).

Test 1 är utfört på glasskiva och inte ett sugande material som är det vanliga. Detta gjordes för att analysera färgbasens specifika emissioner. När färgbasen appliceras på ett sugande underlag så frigörs även syror från trämaterialiet.

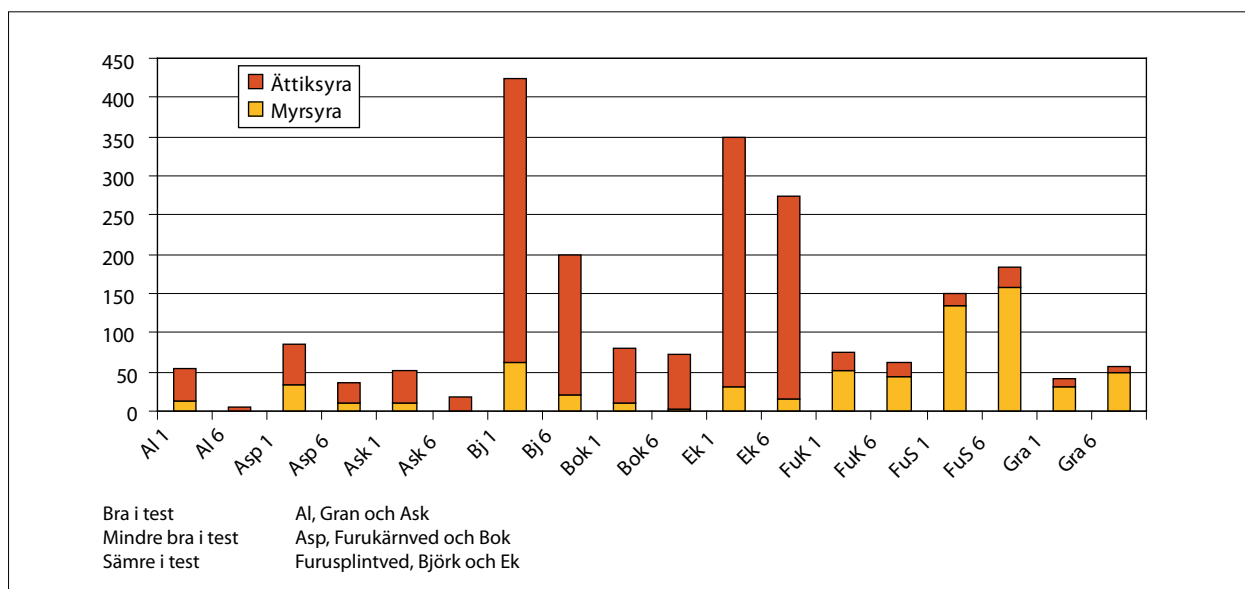
I en andra test, test 2, analyserades Trälack Aqua Blank®, Milltex®, Supersaturated Paint® och Cem-pur® lack som målades på alfanerad lamellskiva, se tabell 11 (s. 35). Den sistnämnda lacken används som stopplack i museisammanhang och har inte testats i test 1.

Alla resultaten i test 2 har högre värden än de lägsta värdena efter tre dygn i test 1.

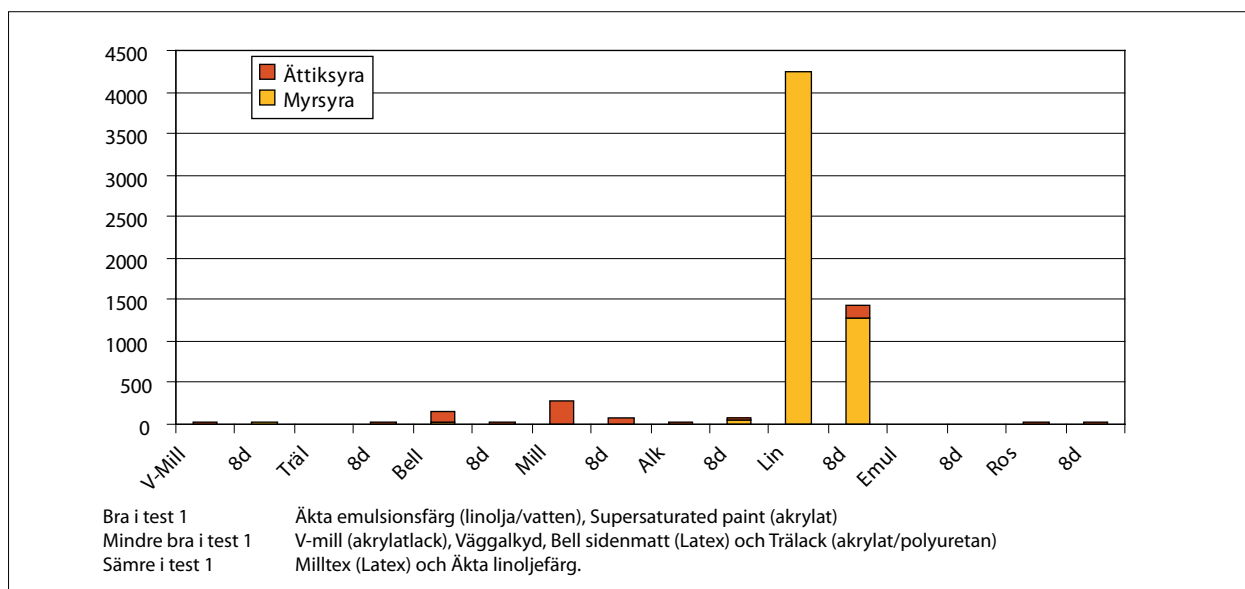
Här är Milltex bäst i test sedan kommer Cem-pur två strykningar plus Milltex. Endast strykning



Figur 17. Träskivor. Mätningar av myr- och ättiksyraemissioner efter tre dygn, en månad och sex månader,



Figur 18. Träslag. Mätningar av myr- och ättiksyra emissioner efter en månad och sex månader.



Figur 19. Färgbaser. Test 1, mätningar av myr- och ättiksyra emissioner efter två dygn och åtta dygn.

med Cempur har något högre värden än föregående. Supersaturated Paint var näst sämst och Trälacken hade högsta värden för myrsyra och ättiksyra. Tyvärr hade vi inte möjlighet att utföra fler analyser. Troligen sjunker värdena för färgbaser på trämaterial med tiden. Det vi kan se är att ansenliga mängder emitteras efter målning på trä och skivmaterial.

Referenser

Endt, D.W., von Erhardt, W.D. & Hopwood, W.R. 1995. Evaluating materials used for constructing storage cases. Storage of Natural History

Collections. Vol. 1, SPNHC, Dep. of Geology, University of Iowa.

Raychaudhuri, M. R. & Brimblecombe, P. 2000. Formaldehyde oxidation and lead corrosion, Studies in Conservation 45.

Ryhl-Svendsen, M. 1997. Brug av gode/dårlige materialer i udstillingsopbygning, Nordisk Konservator Forbunds Bulletin og Dansk Museumsforenings årsmøde. Fuglsø.

Tetreault, J. 1994. Display Materials: The Good the Bad and the Ugly, preprints SSCR Conference Exhibitions and Conservation in Edinburgh.

www.iaq.dk

Bilaga 1. Utveckling av enkel emissionstest

Av Monika Fjaestad, RAÄ och Anders Karlsson, SCA (tidigare RAÄ)

Inom konserveringsområdet har en enkel metod för att utvärdera emissioner utvecklats på British Museum av A. Oddy m.fl. Den publicerades redan 1967 och har kommit till användning på många museer. Numera benämns metoden som British Museum Standard test. Metoden finns beskriven i detalj i *Studies in Conservation* nr 40 (Green & Thickett 1995:145–152).

Metoden

I korta drag utförs metoden på följande sätt: Cirka 2 g av materialet som ska testas läggs i en 50 ml glaskolv tillsammans med en 0,5 ml provkolv fylld med destillerat vatten. Provkolven har en propp av bomull och placeras stående bredvid testmaterialet. En metallkupong tillverkas av helt rent (99,5 % eller renare) silver, koppar eller bly och förses med ett upphängningshål. Val av metall beror på vilka föroreningar som ska spåras, se bilaga 2. Metallkupongen rengörs med en glasfiberborste, doppas och tvättas i propanol under några minuter. Därefter träs en nylontråd genom hålet i kupongen.

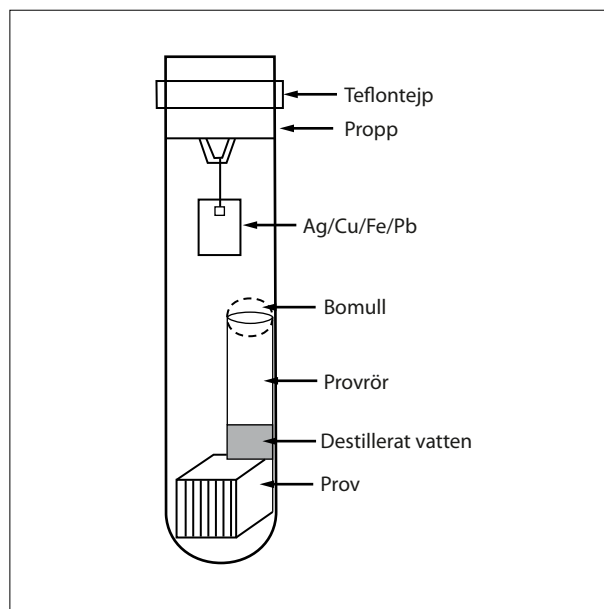
Kupongen fästs så den blir hängande i glaskolven genom att den slipade glasproppen trycks på. Proppen förseglas genom att värma fast en 15mm lång krympslang med en varmluftspistol. Därefter placeras kolven i en värmeugn med 60°C värme under 28 dygn. När provet är klart görs en visuell bedömning där resultatet delas in i tre klasser.

P = Ingen förändring jämfört med blankprov.

T = en aning missfärgning längst kanterna och några få fläckar på ytan.

U = klart synlig korrosion eller avsaknad av glans.

Endast inredningsmaterial som klarar bedömning P rekommenderas för permanent användning i museisammanhang. När det gäller material som ger T som resultat kan de möjligen användas för korttidsbruk. Klass U är olämpliga för ändamålet.



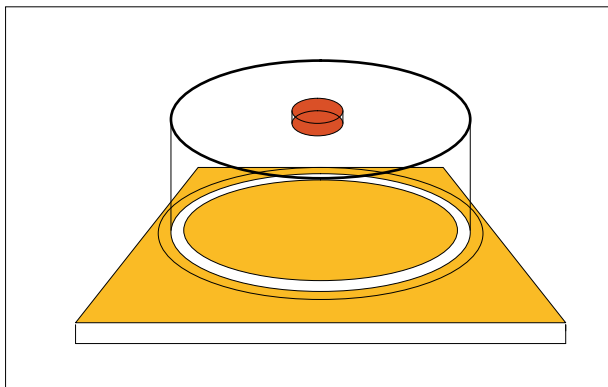
Figur 20. Oddy-test, efter Myong-Nam Kim.

British Museum Standard test som metoden kallas ger inga kvantitativa värden och är inte alltid helt reproducerbar. Problem kan uppstå vid accelererat åldrande vid hög temperatur. Metallernas passivering för olika pH kan ändras med temperaturen. Vid visuell bedömning kan transparenta korrosionsprodukter undgå upptäckt. Metoden är mycket användbar men tar 28 dygn att genomföra.

En kvantitativ emissionstest

Ett av projektets mål var att om möjligt utveckla en snabb, enkel, kvantitativ emissionstest för museibruk. Flera experiment utfördes. Det var glaslock som fastnade och kondens på metallkuponger där korrosionen formligen rann av.

Goda idéer får fötter. På ISIAQ-mötet i Espo, Finland år 2000 presenterade T. Akutsu en förenklad emissionstest, kallad ADSEC (Akutsu m.fl. 2000:477). Testet är en förenkling av FLEC®-metoden. Denna idé kunde modifieras för museibruk.



Figur 21. Schematisk skiss över ADSEC-metoden.

Principen liknar FLEC®-metoden på det viset att en exponeringskammare används, där ytan man vill mäta emissioner från utgör en del av kammarens vägg. Skillnaden ligger i att med ADSEC placeras provuppsamlaren inuti kammaren, medan i FLEC®-metoden får ett gasflöde ta med sig avgivna gaser till en externt placerad provtagare via rör.

Metoden lämpar sig för alla typer av plana trämaterial, men även andra material som en laminatytta, plastskivor, eller en målad yta. Ytan får dock inte vara för grov i strukturen, eftersom det är helt nödvändigt att det blir en tät anslutning mellan provtagningsutrustningen och provmaterial.

Material och utförande

Provtagarna som används är IVL:s passiva provsamlare för syror eller aldehyder. Provtagarna som är små, cirka 20 mm i diameter och cirka 10 mm höga, fästs med hjälp av en neutral aluminiumtape i botten på en kristallisationsskål, som är 90 mm i diameter och 100 mm hög. Kristallisationsskålen ska ha planslipad kant för att kunna ligga helt jämnt mot underlaget, utan glipor. Skålen ställs med botten upp på materialet som ska testas. Tätning mellan provytan och glaskan-ten består av en neutral siliconpackning. Packningen är 0,5 mm tjock och skärs till så att innerdiametern är 88 mm och ytterdiametern är 100 mm. På skålens uppåtvända botten läggs en vikt av 0,5 kg för att på så vis säkerställa att det inte finns några glipor mellan provmaterialet och glaskupan.

Själva exponeringen av provsamlaren bör pågå i 24 timmar. När exponeringen är klar förpackas provsamlaren och skickas för analys på IVL. Resultaten

från analysen anges i enheten mikrogram per dygn ($\mu\text{g}/\text{dygn}$). För att beräkna hur mycket som avges från provytan måste hänsyn tas till storleken på provytan som exponerats i kammaren, i det här fallet blir det $0,0061 \text{ m}^2$. Resultatet skall också omräknas så att svaret anges i timmar istället för dygn. Beräkningen av avgivningshastigheten blir då:

$$\text{Avgivningshastigheten } (\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}) = \text{resultat från IVL } (\mu\text{g}/\text{dygn}) / 0,0061 (\text{m}^2) \times 24 (\text{h}/\text{dygn})$$

Testet har provats och jämförts med FLEC®-mätningar utförda på Trätek AB på delar av samma material som i vår studie. Korrelationen var acceptabel.

Metoden är relativt billig, med enkel utrustning och relativt enkel att genomföra. Materialet behöver inte konditioneras eller på annat sätt förbehandlas. Det man behöver ta ställning till är om materialet är nyligen sågat, målat, eller har på något annat vis preparerats vilket kan påverka avgivningen av gaser. Om man mäter över en nypreparerad yta kommer man att få avgivningsvärden som ligger högre än om materialet hade varit orört eller fått ligga en tid och konditionera.

Det är lämpligt att utföra flera tester samtidigt. Svar från analysen kan dock dröja om inte avtal om leveranstid har slutits. Några absoluta gränsvärden för vilka avgivningsmängder eller koncentrationer som är skadliga finns inte, men genom att relatera uppgifter angivna i rapporten får man ett underlag för att kunna göra en bedömning om risker för skador.

Referenser

- Akutsu, T. m.fl. 2000. Development of measurement device for aldehyde emission rates using a diffusive sampler, Proceedings from the conference Healthy Buildings, ISIAQ, 2000, Espo, Vol. 1.
- Blackshaw, S.M. & Daniels, V.D. 1978. Selecting safe materials for use in storage and display in museums, ICOM Committee for Conservation 5th Triennial Meeting Zagreb.
- Green, L.R. & Thickett, D. 1993. Interlaboratory comparison of the Oddy test, Conservation science in the UK. Ed. Tennent, N.H.
- 1995. Testing materials for use in the storage and display of antiquities – a revised methodology. Studies in conservation, 40.

Bilaga 2. Metallkorrosion i inomhusatmosfär

Av Einar Mattsson, professor emeritus

Inledning

Denna översikt, som är baserad på litteraturstudier, avser främst atmosfärisk korrosion i museimiljö och är begränsad till metallerna silver, koppar, järn, bly och zink. Studien inriktas i synnerhet på huvudorsakerna till korrosion med tanke på motåtgärder. Kinetiken för korrosionsförloppet är till stor del outredd och behandlas inte här. Fundamentala studier av den atmosfäriska korrosionen inomhus har utförligt beskrivits av Knotkova m.fl. (1990, 1995).

Enligt Fyfe (1994:2:31–2:41) kan man lämpligen särskilja två huvudtyper av atmosfärisk korrosion i inomhusmiljö:

- *Torr korrosion.* Denna kan äga rum i frånvaro av elektrolytfilm på metallytan och sker genom reaktion mellan metallen och en eller flera ämnen i den omgivande atmosfären, t.ex. syre eller svavelväte.
- *Våt korrosion.* Denna äger rum i närvaro av en elektrolytfilm av H_2O på ytan. Elektrolytfilmen är en förutsättning för att de elektrokemiska korrosionscellerna ska kunna verka.

Torr korrosion

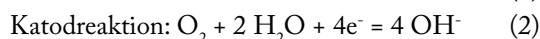
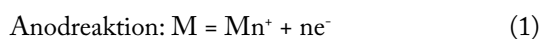
Ett exempel på torr korrosion är oxidbildning på en metallyta, som utsätts för inomhusatmosfär vid rumstemperatur. Processen fortskrider i närvaro av redan bildad oxid genom transport av elektroner och joner via felställen i oxidkristallernas struktur. Vanligen minskar oxidskiktets tillväxthastighet med tiden, allteftersom skiktets tjocklek ökar och därmed transportsvårigheter tilltar. Vid rumstemperatur får de flesta metaller snabbt en tunn, osynlig oxidbeläggning. Tillväxten avstannar emellertid redan vid en tjocklek av storleksordningen 30 Å, d.v.s. innan oxidskiktet uppnått en synlig tjocklek (Fyfe 1994:2:31–2:41).

Ett annat aktuellt exempel på torr korrosion är sulfidering av silver i atmosfär som innehåller sva-

velväte (H_2S) och carbonsulfid (COS). Härvid får en yta en beläggning av silversulfid. Sulfidskiktets tillväxthastighet avtar emellertid inte med tiden utan förblir i det närmaste konstant, varför sulfidskiktet så småningom uppnår så stor tjocklek att det blir synligt som en svart beläggning.

Våt korrosion

Vid våt korrosion sker korrosionen i elektrokemiska korrosionsceller, där metallens oxidation utgör anodreaktion och reduktion av ett oxidationsmedel utgör katodreaktionen, vanligen reduktion av luftens syre.



För att korrosionscellerna ska kunna verka fodras närvaro av en elektrolyt på metallen. Elektrolyten kan utgöras av vatten med däri lösta joner. Det är ofta närvaron av elektrolytfilm som är den kontrollerande faktorn vid atmosfärisk korrosion inomhus men även föroreningar som absorberas i fuktfilmen från den omgivande atmosfären kan starkt påverka korrosionshastigheten.

Bildning av fuktfilm på metallytan

Relativ luftfuktighet

På en plan, ren metallyta sker kondensation av vatten då daggpunkten uppnås, d.v.s. då luftens relativa fuktighet (RH) är 100 %. Även om RH är lägre än 100 % har emellertid en plan metallyta en tunn vattenfilm, bunden till ytan genom Van der Waalska krafter. Vid en RH av 55 % anses denna film ha en tjocklek av cirka 15 molekyllager och tjockleken ökar med stigande RH till cirka 90 molekyllager strax under 100 %. Även tunna fuktfilmer är tillräckliga för att de elektrokemiska korrosionscellerna ska kunna verka. Vid minskning av fuktfilmstjockleken då RH avtar ökar reaktionssvårigheterna i korrosionscellerna, d.v.s. den elektrokemiska polarisationen, så att korrosionen

är praktiskt taget försumbar vid en RH under 60% (Fyfe 1994:2:31–2:41).

I detta sammanhang ska framhållas att RH (vid konstant absolut fuktighet) varierar med temperaturen med följd att temperaturvariationer kan leda till perioder med väsentligt högre RH än genomsnittet. Under vintern antar RH inomhus vanligen låga värden därför att utifrån kommande luft uppvärms vid inträdet. Under sommaren däremot blir RH inomhus ofta hög, eftersom ingen uppvärmning sker utan ibland t.o.m. avkylning. För upprätthållande av en tillfredställande låg RH inomhus kan då avfuktning erfordras, t.ex. med hjälp av torkmedel eller avfuktningsslaggregat – vidare kan framhållas att det föreligger risk för kondens på ett kallt föremål som förs in i varm luft.

Kapillärkondensation

Om metallytan inte är plan utan konkav, såsom är fallet i kapillärer hos porösa beläggningar, inträffar kondensation vid en RH som är lägre än 100 %, så kallad kapillärkondensation. I tabell 14 anges samband mellan ytans krökningsradie och den lägsta RH då kapillärkondensation äger rum.

Tabell 14. Samband mellan ytans krökningsradie (r) och lägsta relativa fuktighet RH för kondensation (Fyfe 1994:2:31–2:41).

r [Å]	RH %
360	98
94	90
47	80
30	70
21	60
15	50

Kemisk kondensation

Som den svenske elektrokemisten Wilhelm Palmer påpekat redan år 1926 kan emellertid även hygroskopiska ämnen bidra till att en elektrolytfilm bildas på ytan vid en RH lägre än 100 % (Evans 1948:151–159). Man talar då ibland om ”kemiska kondensation” (Fyfe 1994:2:31–2:41). Sådana hygroskopiska ämnen kan utgöras av korrosionsprodukter eller ha tillförts ytan på annat sätt, t.ex. från den omgivande atmosfären genom deposition av damm eller sorption av gasformiga ämnen. På arkeologiska metallföremål kan också hygroskopiska ämnen t.ex. klorid ha tillförts strukturen vid den föregående exponeringen i jord. Ett hygroskopiskt salt har god löslighet i vatten och en mättad lösning av ämnet står i jämvikt med den omgivande luften vid en viss RH som är lägre än 100 % och som Vernon kallade den kritiska fuktigheten (CH) för ämnet i fråga (Evans 1948:151–159).

Om atmosfärens RH är högre än CH, absorberas fukt från luften till jämvikt uppnås mellan den på ytan bildade lösningen och atmosfären. Sålunda är ytan fuktig och viss risk för korrosion föreligger om luftens RH är högre än CH. Är RH däremot lägre än CH, kan ytan förväntas vara torr, med följd att korrosion inte kan ske.

En uppskattning av vattenångans jämviktstryck (p_s) över en mättad saltlösning i vatten kan göras med hjälp av Raoult's lag, om man känner det lösta ämnets molbråk (x) och ångtrycket för rent vatten (p°) vid ifrågavarande temperatur. Förhållandet p_s/p° är ett uttryck för den kritiska fuktigheten.

$$\text{Raoult's lag } p_s = x p^\circ$$

Inverkan av luftföroreningar

Föroreningshalter

I allmänhet har atmosfären lägre halter av föroreningar inomhus än utomhus. Det omvända förhållandet gäller dock för NH_3 -relaterade föreningar, vilka emanerar från t.ex. individer som vistas i lokalen, och för flyktiga organiska föreningar (VOC), som härrör från t.ex. trä, plast, lim och ytbehandlingsmedel i inredningen (Johansson, E. 1998, Leygraf & Graedel 2000). I tabell 15 anges vanliga föroreningar i inomhusatmosfär och typiska halter för dessa (Graedel 1992:1962, Leygraf 1995:421–455). I slutna utrymmen såsom skåp och montrar kan dock halterna vara väsentligt högre; enligt Tétreault m.fl. (1998:17–32) kan t.ex. CH_3COOH -halten i en sluten monter av

Tabell 15. Karakteristika för ett urval gasformiga luftföroreningar, som medverkar vid atmosfärisk korrosion inomhus; C_i = typisk koncentration i luften, H_i = konstanten Henry's lag, c_i = koncentrationen i fuktfilm på metallytan vid jämvikt (Graedel 1992, Leygraf 1995).

Förening	C_i ppbv	H_i mol/atm	c_i mikromol/l
O_3	18	$1,8 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-4}$
H_2O_2	5	$2,4 \times 10^5$	$1,2 \times 10^3$
H_2S	0,3	$1,5 \times 10^{-1}$	$4,5 \times 10^{-5}$
COS	0,6	$3,7 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-5}$
SO_2	30	1,4	$4,2 \times 10^{-2}$
HCl	0,4	$2,0 \times 10$	$8,0 \times 10^{-3}$
Cl_2	0		
NH_3	10	$1,0 \times 10$	10×10^2
NO_2	4	$7,0 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-5}$
HNO_3	3	$9,1 \times 10^4$	$2,7 \times 10^2$
CO_2	$6,0 \times 10^5$	$3,4 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10$
HCHO	10	$1,4 \times 10^4$	$1,4 \times 10^2$
HCOOH	20	$3,7 \times 10^3$	$7,4 \times 10$
CH_3COOH	20	$8,8 \times 10^3$	$8,8 \times 10$

Tabell 16. Kritisk fuktighet (CH) hos tänkbara korrosionsprodukter.

Förening	Temperatur C°	CH%	Referens
AgCl	20	Ca 100	HBCF
Ag ₂ SO ₄	20	Ca 100	HBCF
AgNO ₃	20	84	Gmelin
AgC ₂ H ₃ O ₂	20	Ca 100	HBCF
CuCl ₂ × 2 H ₂ O	20	68	Fyfe 1994
CuSO ₄ × 5 H ₂ O	20	98	Fyfe 1994
Cu NO ₃ × 6 H ₂ O	0	Ca 88	HBCF
Cu(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ × H ₂ O	20	Ca 100	HBCF
Cu(CHO ₂) ₂	20	Ca 100	HBCF
FeCl ₂ × 4 H ₂ O	20	44–55	Turgoose 1982
FeCl ₃ × 6 H ₂ O	25	48	Bukowiecki 1966
β-FeOOH + Cl	20	15–20	Turgoose 1982
Fe SO ₄ × 7 H ₂ O	20	92	Fyfe 1994
Fe ₂ (SO ₄) ₃ × 9 H ₂ O	20	Låg	Gmelin
Fe(NO ₃) ₃ × 9 H ₂ O	20	Ca 95	Gmelin
Fe(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ × 4 H ₂ O	20	Låg	HBCF
Fe(CHO ₂) ₂	20	Ev. Låg	HBCF
PbCl ₂	20	Ca 100	HBCF
PbSO ₄	20	Ca 100	HBCF
Pb(NO ₃) ₂	20	96	Gmelin
Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ × 3 H ₂ O	20	99	Gmelin
Blyhydroxiacetat	20	Låg	HBCF
Pb(CHO ₂) ₂	20	Ca 96	Gmelin
Blyhydroxiformiat	20	Hög	Gmelin
ZnCl ₂ × H ₂ O	20	10	Fyfe 1994
ZnSO ₄ × 7 H ₂ O	20	90	Fyfe 1994
Zn(NO ₃) ₂ × 6 H ₂ O	20	43	Gmelin
Zn(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	20	Ca 96	HBCF
Zn(CHO ₂) ₂ × 2 H ₂ O	20	Ca 100	HBCF

olämpligt trämaterial bli så hög som 200 ppmv. I tabell 15 anges också konstanten H_i för jämvikten mellan föroreningarnas partialtryck (p_i uttryckt i atm) i atmosfären och deras halt (c_i uttryckt i mol/l) i en vattenlösning, t.ex. fuktfilmen på en metallyta, beräknad enligt Henry's lag:

$$c_i = H_i \times p_i$$

Skyddande beläggning

Korrosion i närvaro av elektrolytfilm kan inom det neutrala pH-området (pH ca 6–8) mer eller mindre direkt resultera i en beläggning av svårslöslig oxid, hydroxid eller hydroxisalt, som ger visst skydd mot fortsatt korrosion. Vid lågt pH värde (pH 5 eller lägre) är emellertid sådana skyddande beläggningar i många fall inte stabila, varför korrosionen resulterar i lösliga korrosionsprodukter som inte hämmar fortsatt angrepp. Som framgår av reaktionsformel (2) medför emellertid korrosionen med tiden bildning av OH⁻-joner med pH-ökning som följd, vilket kan leda till

Tabell 17. Kritisk fuktighet (CH) för några tänkbara dammkomponenter vid 20°C.

Förening	CH%	Referens
NaCl	76	Fyfe 1994
KCl	86	Fyfe 1994
NH ₄ Cl	80	Fyfe 1994
Na ₂ SO ₄ × 10H ₂ O	93	HBCF
K ₂ SO ₄	98	Fyfe 1994
(NH ₄) ₂ SO ₄	81	Fyfe 1994
Na ₂ CO ₃ × 10 H ₂ O	92	Fyfe 1994
K ₂ CO ₃ × 2 H ₂ O	44	Fyfe 1994
Na ₃ PO ₄ × 10 H ₂ O	95	HBCF
CaCl ₂ × 6 H ₂ O	32	Fyfe 1994
MgCl ₂ × 6 H ₂ O	34	Fyfe 1994
Ca ₂ SO ₄ × 2 H ₂ O	99	Bukowiecki 1966
Mg(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	65	HBCF

hydrolys och senare utfällning av t.ex. hydroxisalter. Sådana sekundärt utfälda beläggningar anses inte ge lika gott skydd som samma produkt bildad direkt (Evans 1948:151–159), detta sannolikt på grund av porer och sprickor i skiktet.

Hygroskopiska korrosionsprodukter

Vissa korrosionsprodukter utgörs av hygroskopiska ämnen och kan ge upphov till kemisk kondensation och fortsatt korrosion, om CH överskrids. I tabell 16 anges CH för några korrosionsprodukter som kan tänkas uppkomma på ytor av silver, koppar, järn, bly och zink i inomhusatmosfär. Om korrosionsprodukterna förekommer som en porös beläggning, kan dock CH i praktiken vara lägre än som anges i tabell 16 genom inverkande kapillärkondensation.

Hygroskopiskt damm

Metallytan kan också förorenas genom deposition av hygroskopiskt damm som håller ytan fuktig och därigenom verkar korrosivt (Evans 1948:151–159). I tabell 17 anges CH för några salter som kan tänkas förekomma i damm. Av de i tabellen upptagna ämnena är CaCl₂ × 6 H₂O, MgCl₂ × 6 H₂O och ev. svavelsyrhaltigt sot hygroskopiska vid den RH som vanligen förekommer inomhus. Detsamma torde i vissa fall gälla (NH₄)₂SO₄, som påvisats i beläggningar på metallytor exponerade inomhus, detta även om dess CH är så hög som 81 % (Johansson, E. 1998, Leygraf & Graedel 2000). Om dammet förekommer som en porös beläggning, kan nämligen kapillärkondensation medföra att CH blir lägre än 81 %.

Fingeravtryck

Av intresse är också NaCl med en CH av cirka 76 %. Detta salt kan tillföras ytan, utom i form av damm; även som svett i fingeravtryck. Korrosiviteten hos fingeravtryck varierar starkt hos olika individer och kan vid hög RH framkalla missfärgningar efter några dagar (Mattsson 1958:48–52).

SO₂ och NO₂

En ytterligare möjlighet för fuktbildning på metall-lytan har samband med att vattenlösliga, gasformiga ämnen i atmosfären deponeras på metallytan och där bildar lösningar, som absorberar fukt från atmosfären. Detta torde gälla för SO₂, som genom oxidation omvandlas till en H₂SO₄-lösning i ytans fuktfilm. Denna process katalyseras av de flesta metaller och metalloxider (Fyfe 1994:2:31–2:41). H₂SO₄-lösning förekommer också i sot från oljeeldning. Om atmosfären har en RH som är högre än den bildade lösningens vattenångstryck vid jämvikt, sker vattenabsorption från luften och lösningsmängden växer. I tabell 18 anges samband mellan svavelsyralösningar av olika halt och RH hos luft i jämvikt med dessa. Även om SO₂-halten är så låg att vattenabsorberande H₂SO₄-lösning inte bildas, kan syran minska pH-värdet i fuktfilmen till värden vid vilka skyddande beläggning av t.ex. oxid inte är beständig och därigenom öka korrosionshastigheten (Rice m.fl. 1981:275–284).

NO₂ synes inte spela så stor roll vid atmosfärisk korrosion av metaller inomhus. Johansson (1986) har dock rapporterat att samtidig inverkan av SO₂ och NO₂ har en synergistisk effekt på den atmosfäriska korrosionen hos järn, koppar och zink, hos järn särskilt påtaglig vid låg och måttligt hög RH (ca 50 %).

Myrsyra och ättiksyra

Av särskilt intresse är att korrosionsprodukter bildade på koppar, järn och zink (men ej på silver) under ett års exponering i inomhusatmosfär befunnits innehålla formiat och acetat (Johansson 1998, Leygraf & Graedel 2000). Även Vernon (Evans 1948:151–159) har rapporterat att myrsyraångor kraftigt ökat koppars korrosion i CO₂-haltig atmosfär. Myrsyra (HCOOH) och ättiksyra (CH₃COOH), ev. bildade genom omvandling av aldehyder, ketoner och andra organiska föreningar i luften, synes sålunda spela

Tabell 18. Relativ fuktighet (RH) i jämvikt med svavelsyra i vatten vid 20°C. Referenser för svavelsyra (HBCF) samt för myrsyra och ättiksyra (Sjögren, muntlig uppgift).

Svavelsyra		Myrsyra		Ättiksyra	
Koncentration		Koncentration		Koncentration.	
mass %	RH %	mass %	RH %	mass %	RH %
15	93,9	39	82	45	83
28	80,5	63	53	69	59
40	58,3	79	12	93	24
51	37,1	91	6		
60	18,8				
69	8,5				
78	3,2				

en viktig roll, i synnerhet under inledningsfasen av atmosfärisk korrosion inomhus. Sådana gasformiga föroreningar kan exempelvis härröra från trä, främst ek, bok, kastanj eller björk. Träpulver uppges till följd av fuktning och hydrolys kunna avge myrsyra och ättiksyra motsvarande 3–5 % av den ursprungliga vikten. Träslag som alm, valnöt och furu uppges däremot inte avge så höga halter av nämnda föroreningar (Knotkova-Cermakova & Vlckova 1971: 17–22, Werner 1987:185–187). I extremfall, kan möjligen syrahalterna i atmosfären bli så höga att fuktabsorberande syrafilmer bildas på metallytor (se fig. 6, s. 19 red. anm.).

Som framgår av tabell 15 är emellertid myrsyra och ättiksyra halterna i vanliga inomhusmiljöer endast av storleksordningen 20 ppbv (Graedel 1992) (se omvandlingstabell, tabell 15 s. 46). De syrahalter som då kan uppkomma genom absorption i filmen är; enligt Henry's lag så låga att (av storleksordningen 10⁻⁴ mol/l) att de inte nämnvärt påverkar vattenångans jämviktstryck över lösningen och därmed ej påverka pH-värdet i fuktfilmen. Enligt Hägg (1948:41) är pKs-värdet för myrsyra 3,75 och för ättiksyra 4,76. På grund av den syrahalt som föreligger i fuktfilmen bedöms pH-värdet där cirka 4 eller i extremfall ännu lägre. Vid så lågt pH-värde är de skyddande korrosionsprodukter som normalt bildas ej stabila (Mattsson 1982:9–19, Kucera & Mattsson 1987). Även en låg halt av myrsyra eller ättiksyra i fuktfilmen kan således innebära att metallytan blir frilagd och oskyddad mot korrosion. På analogt sätt kan en låg halt av saltsyra (HCl) i atmosfären, härrörande exempelvis från en klorhaltig plast som PVC, verka försurande på ytans fuktfilm och därigenom påskynda korrosionen.

Silver

Silver är speciellt genom att vara den enda metall som har högre korrosionshastighet i atmosfären inomhus än utomhus (Leygraf & Graedel 2000). Metallen är som nämnts benägen till sulfidering i atmosfär som innehåller svavelväte och carbonylsulfid, varvid bildas en svart beläggning av Ag_2S på ytan. Eftersom sulfidering av silver är en typ av torr korrosion, är den i stort sett oberoende av luftens RH. Processen gynnas däremot av en hög halt av H_2S och påverkas även av O_3 , Cl_2 och HCl (Rice m.fl. 1981:275–283). Det har observerats att vertikala ytor sulfideras snabbare än horisontella, vilket anses bero på att de senare ofta har en skyddande beläggning av damm (Johansson, E. 1998). Silver synes däremot inte vara särskilt känsligt för våt korrosion, vilket sammanhänger med att silver är en ädel metall. Tabell 16 innehåller ej heller några hygroskopiska föreningar som skulle kunna tänkas bildas genom korrosion. Dock ska nämnas att silverklorid påvisats på silverytor som exponerats för inomhusatmosfär (Leygraf & Graedel 2000).

Koppar

Även koppar är känslig för sulfidering. På ytan bildas därvid ett skikt av koppar(I)oxid (Cu_2O) med inslag av koppar(I)sulfid (Cu_2S) eller ett skikt av ren koppar(I)sulfid, i båda fallen med missfärgning som följd. Vernon har rapporterat att en beläggning av ren Cu_2O ger ett visst skydd mot sulfidering, om metallen senare utsätts för H_2S -haltig luft. En beläggning som innehåller sulfid ger däremot inte skydd, även om metallen senare utsätts för ren luft (Evans 1948:151–159). Av särskilt intresse är en starkt synergistisk korrosionseffekt på koppar vid samtidig inverkan av sulfid- och kloridföreningar i atmosfären (Abbott 1990:40–45). Som framgår av tabell 16, har inte heller koppar några utpräglade hygroskopiska korrosionsprodukter.

$\text{Cu Cl}_2 \times 2 \text{H}_2\text{O}$ har dock en CH av cirka 66 % eller eventuellt lägre i porös beläggning där kapillärkondensation inverkar. Detta kan leda till att en kopparyta i närvaro av klorid hålls fuktig, särskilt sommartid, med korrosion som följd. Här kan nämnas att man för undvikande av s.k. bronssjuka hos arkeologiska bronser med kloridförorening rekommenderar förvaring i luft med en RH av högst 35–39 % (Mattsson 1992). Därmed garderar man sig i viss mån för effekten av kapillärkondensation i porös kloridhaltig beläggning.

Som nämnts förekommer ofta formiat och acetat i korrosionsprodukter som bildats på koppar under exponering för inomhusatmosfär (Johansson, E. 1998, Leygraf & Graedel 2000). De kopparformiat och acetat som är upptagna i tabell 16 är inte hygroskopiska. Sannolikt beror närvaron av formiat och acetat på att myrsyra och ättiksyra eller närstående föreningar absorberas i den tunna fuktfilm som finns på metallytan även vid förhållandevis låg RH. Syrorna ger filmen ett pH-värde av cirka 4 eller lägre, vilket medför att skyddande oxidbeläggning upplöses eller inte kan bildas, med följd att ytan blir oskyddad mot korrosion. Den pH-ökning som senare uppkommer genom korrosionen kan visserligen leda till hydrolys och utfällning av oxid, hydroxid eller hydroxidsalt men sådan sekundärt bildad beläggning kan som nämnt vara porös och inte effektivt skyddande. Enligt Knotkova (muntlig uppgift) torde dock myrsyrans och ättiksyrans inverkan vara mer komplicerad än som angivits, varför ytterligare forskning häröver är motiverad.

Järn

Torr korrosion torde inte leda till angrepp på järn av praktisk betydelse i inomhusatmosfär. Däremot finns förutsättningar för våt korrosion. Som framgår av tabell 16 är korrosionsprodukter, som $\text{FeCl}_2 \times 4 \text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \times 6 \text{H}_2\text{O}$ och $\text{Fe}_2(\text{SO}_4) \times 9 \text{H}_2\text{O}$ samt eventuellt också järnacetat och järnformiat, hygroskopiska vid måttligt hög RH. Av särskilt intresse är att $\beta\text{-FeOOH} + \text{Cl}$, som kan bildas på arkeologiskt järn efter utgrävning, har mycket låg CH, 15–20 % (Turgoose 1982:97–101). Möjligen beror detta på att järnkloriden förekommer i en porös beläggning, där kapillärkondensation medverkar till en låg CH. Erfarenheten har visat att man för att undvika fortsatt korrosion av arkeologiskt järn i normal museimiljö måste nedbringa kloridhalten till cirka 0,02 % eller lägre (Mattsson & Norlander 1996). Därtill kan även på järn bildas korrosiv fuktfilm till följd av deposition av hygroskopiskt damm. Vernon fann att stål som skyddades från dammdeposition med muslintyg förblev fritt från rost, medan oskyddat stål rostade (Evans 1948:151–159).

Som Knotkova-Cermakova och Vlckova (1971:17–22) visat kan flyktiga ämnen från trä (ek, bok, kastanj och björk) samt plast (fenolplast) orsaka atmosfärisk korrosion på järn i slutna utrymmen.

Bly

Vid exponering av bly för ren luft bildas snabbt en skyddande beläggning av blyoxid (i huvudsak PbO), detta sannolikt genom torr korrosion.

Werner har emellertid rapporterat att förhistoriskt bly på två månader skadats genom korrosion i förvaring i slutna monter med botten av spånskiva, detta vid en RH av cirka 50 %. Sådana skador, som ibland kallas "montersjuka", har även rapporterats av andra (Lindeqvist 1984, Tétreault m.fl. 1998:17–32) och tillskrivs angrepp av organiska syror emanerande från trämaterial i montern. Tétreault m.fl. har funnit att korrosion kan inträffa, om halten av CH₃COOH i atmosfären är högre än cirka 200 ppb vid en RH av 54 %. Som framgår av tabell 16 kan blyhydroxisacetat till följd av sin stora löslighet och hygroskopicitet spela en roll vid denna korrosion. Då blyhydroxidacetat reagerar med luftens CO₂ under bildning av svårslösligt blyhydroxidkarbonat frigörs CH₃COOH, vilket kan bidra till att reaktionen fortsätter. Enligt Tétreault m.fl. bör man för att undvika korrosion hålla CH₃COOH-halten under cirka 40 ppbv och RH vid max 40 %. I vissa fall av "montersjuka" har dock korrosionsprodukterna enligt Lindeqvist (1984) visat sig bestå av blyformiat. Då lättlösliga och hygroskopiska blyformiat eller blyhydroxiformiat, analoga med motsvarande blyacetater, av allt att döma inte är kända, är vidare utredning av korrosionsförloppet önskvärd. Eventuellt kan myrsyrans sänkning av pH-värdet i fuktfilmen på metallytan och därmed sammanhängande upplösning av skyddande oxidbeläggning spela en roll.

Det ska framhållas att blyulfat (PbSO₄) är svårslösligt och ger skydd mot atmosfärisk korrosion (Fyfe 1994:2:31–2:41).

Zink

Som framgår av tabell 16 kan förutsättningar för våt korrosion skapas av vissa korrosionsprodukter; ZnCl₂ × H₂O har mycket låg CH (10 %) och Zn(NO₃)₂ × 6 H₂O har relativt låg CH (43 %). Detta indikerar korrosionsrisk vid närvaro av klorid- och kväveoxidhaltiga föroreningar även vid låg RH. Absorption av föroreningar som kan ge upphov till syra i fuktfilm på metallytan, såsom H₂SO₄, myrsyra (eller formaldehyd) och ättiksyra kan även skapa förutsättningar för atmosfärisk korrosion hos zink genom att upplösa normalt skyddande zinkhydrox-

idkarbonatbeläggning eller hindra att sådan bildas. Myrsyrans och ättiksyrans roll vid den atmosfäriska korrosionen på zink i inomhusatmosfär synes dock inte vara helt utredd (Knotkova, muntlig uppgift).

Slutsatser

I fråga om atmosfärisk korrosion på de aktuella metallerna i museimiljö spelar torr korrosion genom inverkan av svavelväte och karbonylsulfid stor roll hos silver och en viss roll även hos koppar. Koppar, järn, bly och zink angrips i huvudsak av våt korrosion. En avgörande fråga är huruvida en fuktfilm finns på ytan. Detta påverkas av parametrar som luftens relativa fuktighet, temperaturvariationer, korrosionsprodukternas hygroskopicitet samt deposition av hygroskopiskt damm och andra hygroskopiska luftföroreningar. En annan viktig fråga vid våt korrosion är huruvida pH-sänkande luftföroreningar absorberas i fuktfilmen, vilka kan hindra att skyddande beläggningar bildas eller är stabila på metallytan.

Risken för atmosfärisk korrosion kan begränsas genom följande:

- Låg relativ fuktighet, helst under de värden som anges i tabell 16 med hänsyn tagen till föroreningsituationen.
- Jämn temperatur, så att perioder med hög fuktighet undviks.
- Undvikande av korrosiva inredningsmaterial i metallföremålens närhet.
- Skydd mot deposition av hygroskopiskt damm på metallföremålen.
- Kloridextraktion från arkeologiskt material, t.ex. järn och brons som har stor kloridförorening i strukturen.
- Hantering av metallföremål med bomullsvantar.

Referenser

- Abbott, W.H. 1990. "The Corrosion of Copper and Porous Gold in Flowing Mixed Gas Environments," IEEE Trans. Components, Hybrids, and Manufacturing Techn. 13.
- Bukowiecki, A. 1966. Schweiz. Arch. 32, p. 42.
- Evans, U. R. 1948. Metallic Corrosion, Passivity and Protection. Edward Arnold & Co, London.
- Fyfe, D. 1994. The atmosphere. In Corrosion and Corrosion Control. Eds L.L. Sheir, R.A. Jarman & G.T. Burstein. Butterworth-Heinemann. London.

- Graedel, T.E. 1992. *J. Electrochem. Soc.* 139.
- Hägg, G. 1948. *Kemisk reaktionslära*. Almqvist & Wiksell, Uppsala.
- HBCF 1949. *Handbook of Chemistry and Physics*, 31st ed, Chemical Rubber Publishing Co, Cleveland, Ohio.
- Johansson, E. 1998. Corrosivity measurements in indoor atmospheric environments – A field study. Lic.-avhandling, KTH, Stockholm.
- Johansson, L.-G. 1986. A laboratory study of the influence of $\text{NO}_2 + \text{SO}_2$ on the atmospheric corrosion of steel, copper, zinc and aluminium. *Proc. Electrochem. Soc.* 86, p. 267–279.
- Knotkova-Cermakova, D. & Vlckova, J. 1971. Corrosive effect of plastics, *Br. Corros. J.* 6.
- Knotkova, D. & Vlckova, J. 1990. Metalcorrosion in museum environments. Report from National Research Institute for Protection of Metals. Prague.
- Knotkova, D., Vlckova, J. & Kreislova, K. 1995. Environmental effects on corrosion of metals in indoor locations. Report from SVUOM, Prague.
- Kucera, V. & Mattsson, E. 1987. *Elektrokemi och korrosionslära*, Korrosionsinstitutet, KIMAB/Swerea.
- 1987. Atmospheric corrosion, In *Corrosion Mechanisms*. Ed. Mansfeld F., Marcel Dekker, New York, p. 421–455.
- Leygraf, C. 1995. Atmospheric corrosion. In *Corrosion Mechanisms in Theory and Practice*. Eds. Marcus, P. & Oudar, J., Marcel Dekker, New York.
- Leygraf, C. & Graedel, T.E. 2000. Corrosion in indoor exposures. In *Atmospheric Corrosion*. John Wiley & Sons, New York.
- Lindeqvist, C. 1984. Blyformiat, en utställningsskada. Afgangssopgave vid Konservatorsskolen, Det Kongelige Danske Kunstakademi, Köpenhamn.
- Mattsson, E. 1958. Staining of copper and brass. *Corrosion* 14:Febr.
- 1982. The atmospheric corrosion properties of some common structural metals – A comparative study. *Mater. Perf.* 21:7.
 - 1992. Bronssjuka hos arkeologiska artefakter – orsaker, förlopp och motåtgärder. RIK 5, Riksantikvarieämbetet, Stockholm..
- Mattsson, E. & Norlander, Å. 1996. Bevarande av arkeologiskt järn efter utgrävning. RIK 13, Riksantikvarieämbetet. Stockholm.
- Rice D.W., Peterson P., Rigby E.B., Phipps P.B.P., Cappell R.J. & Tremoureux, R. 1981. Atmospheric corrosion of copper and silver, *J. Electrochem. Soc.*, 138(2).
- Tétrault, J., Sirois, J. & Stamatopoulou, E. 1998. Studies of lead corrosion in acetic acid environments. *Studies in Conservation*.
- Turgoose, S. 1982. Post-excavation changes in iron antiquities. *Studies in Conservation*.
- Werner, G. 1987. Corrosion of metal caused by wood in closed spaces. In *Recent Advances in the Conservation and Analysis of Artefacts*. Ed. Black, J. Gmelins Handbuch.

Muntliga uppgifter

- Knotkova, Dagmar. 2000. SVUOM, Prague.
- Sjögren, C.-A. 2000. Perstorp Speciality Chemicals, Perstorp.

Bilaga 3. Passiva provsamlare för mätning av gasformiga föroreningar

Av Martin Ferm, Svenska miljöinstitutet AB (IVL)

Bakgrund

Luftföroreningar skadar inte bara människor, djur och vår natur. De kan även förstöra material och föremål i byggnader etc. Dessa måste därför underhållas, repareras eller ersättas. Föremål som förvaras i museum är ofta ovärderliga och kan inte ersättas. De bör därför inte utsättas för luftföroreningar. Luftföroreningar kommer i regel in i museum via ventilation direkt utifrån, utan rening. Museerna ligger i regel i våra förorenade storstäder.

Material kan inte bara skadas av korrosiva gaser. Vissa material kan även avge gaser. Såväl människor som de flesta organiska material (trä, papper, tyg, plast etc.) avger gaser. Luftföroreningar kan således även komma inifrån ett museum. Dessa gaser skadar inte de material som de avgivits från, men kan skada andra material. Hur stor skadan blir beror naturligtvis både på hur hög halt av gasen som finns i luften och kontakttiden. Man minskar halten gas i luften genom att ta in "frisk luft". Det låter kanske konstigt att man kan göra luften renare genom att ventilerar med förorenad uteluft. Det beror på att halterna inomhus av många gaser är högre än utomhus. Ventilation kostar pengar dels därför att fläktarna drar ström, men framförallt för att utomhusluften i regel måste värmas upp. Man vill därför ha så låg ventilation som möjligt. På moderna kontor och möteslokaler styrs ventilationen av hur mycket koldioxid som finns i luften. Koldioxiden kommer från människans utandningsluft. Man brukar inte kosta på ventilation i förrådsutrymmen. Där vistas ju inga människor. Men om man förvarar något som avger någon gas i ett förråd så blir gashalten där så småningom mycket hög. Det kan man känna på lukten när man går in i en källare eller ett arkiv. När man började tillverka möbler av spånskivor i stället för av gediget trä, var det många som fick besvär av den formaldehyd som spånskivorna avgav. Det drabbade även museerna. Även trä i sig kan avge gasformiga föroreningar såsom myrsyra och ättiksyra. Vissa material som kalksten

och bly förstörs av dessa syror. Som ett exempel kan nämnas en kalkstensskulptur som förvarades i en tillsluten låda av "museisäker plywood". Efter flera års förvaring visade det sig att skulpturen förstörts av ättiksyra från lådan. Montrar är ett annat exempel på utrymmen som ofta inte ventileras.

Hur kan man mäta halten skadliga gaser?

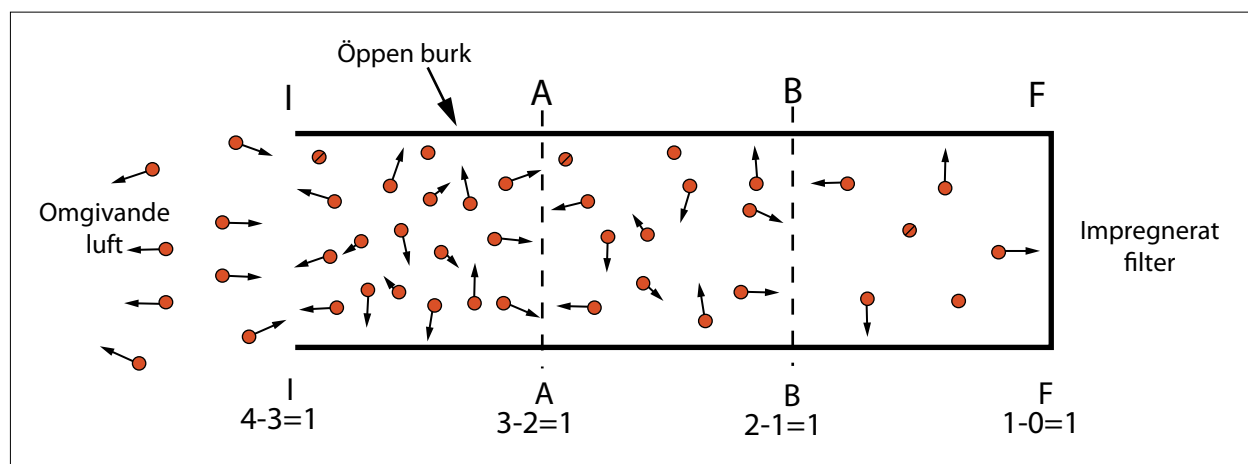
Det finns många olika sätt att mäta halten av en gas på. Det vanligaste är nog att man suger in luft till en bubblflaska som löser gasen i en vätska eller till ett behandlat filter där gasen fastnar. Sedan tar man med sig flaskan eller filtret till ett laboratorium för analys. Vissa gaser kan man mäta halten av med ett elektriskt instrument. Då behöver man inte skicka in provet till något laboratorium utan kan läsa av halten på en visare eller en skärm. Instrumenten är dyra och kräver i regel en tekniker som sköter och kalibrerar det.

Nu finns det ett enklare sätt som baserar sig på att molekylerna själva tar sig in till ett filter. En gasmolekyl står aldrig stilla utan är i ständig rörelse. Molekylernas rörelseenergi är det vi kallar för temperatur. Lätta molekyler rör sig snabbare än tyngre molekyler vid samma temperatur. Kvävgasmolekyler (huvudbeståndsdelen i luft) har en medelhastighet av 500 meter per sekund vid 25°C. Eftersom avståndet mellan molekylerna är så litet kolliderar de med varandra och ändrar fart och riktning flera miljarder gånger per sekund. De förflyttar sig därmed slumpvis runt omkring. Om ett stort antal molekyler befinner sig på en viss plats, så kan man beräkna hur många som har förflyttat sig i en viss riktning efter en viss tid. De rör sig ut från det centrum där de befann sig från början och strävar efter att fördela sig jämnt inom det rum där de befinner sig. Koncentrationen av en viss gas tenderar alltid till att bli jämt fördelad i rummet. Processen går fort över små sträckor men går långsammare över längre sträckor. Rörelsemönstret som kallas

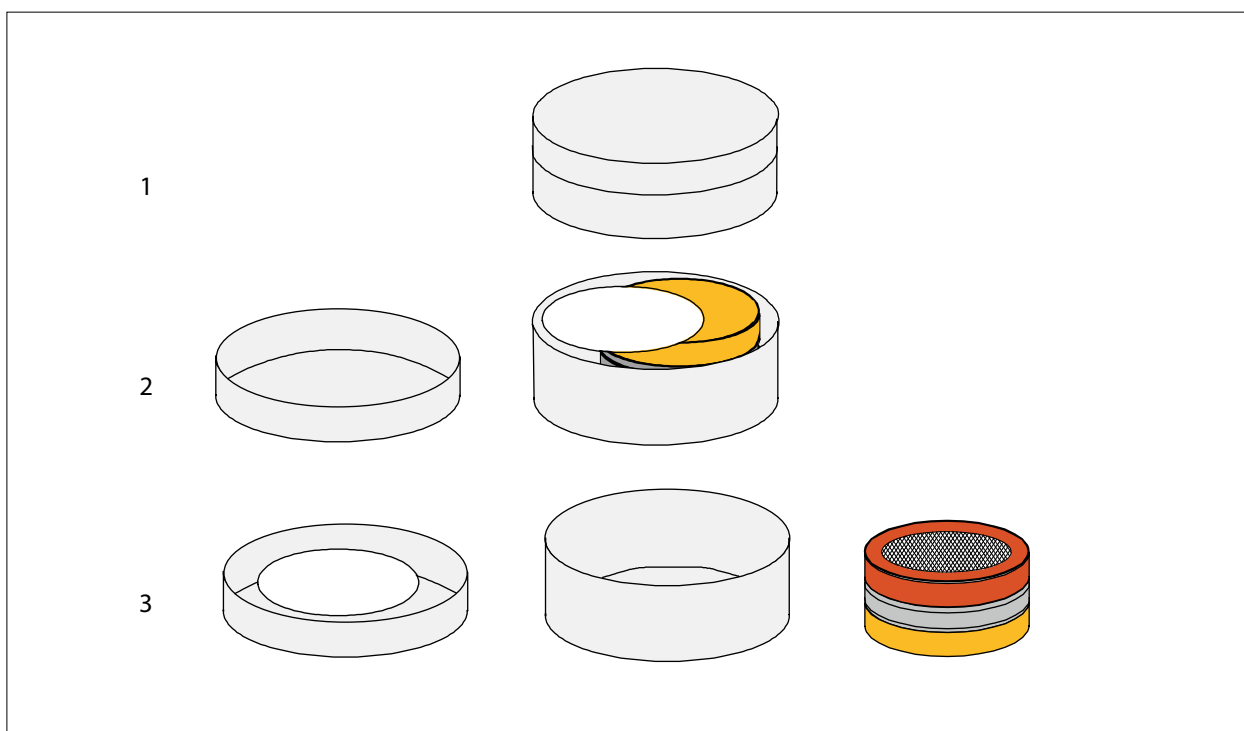
för molekylär diffusion har därför bara betydelse upp till ett par centimeter. På längre avstånd är det turbulent diffusion som jämnar ut koncentrationerna. Den molekylära diffusionen utnyttjas för att ta luftprov med en provtagare som kallas diffusionsprovtagare. Den behöver ingen elektricitet eller annan energitillförsel utan är helt passiv. Den kallas därför oftast för passiv provtagare. Diffusionsprovtagare är dock mera specifikt eftersom det finns olika typer av passiva provtagare. Provtagnings tekniken bygger på att man plockar bort alla molekyler av ett visst slag från luften genom att impregnera ett filter med något som absorberar gasen man vill provta, och därmed kommer koncentrationen av den gasen att minska runt filtret. Som tidigare nämnts kommer då gasmolekylerna (av den gas som absorberas av filtret) att jämnas ut koncentrationen genom att röra sig mot filtret. På så sätt tas provet. Eftersom koncentrationen av en gas kan variera med tiden, vill man ha ett riktigt så kallat tidsmedelvärde av koncentrationen. När man suger in luft till en provtagare (aktiv provtagning) är det viktigt att pumpen suger med jämn hastighet under hela provtagnings tiden. På samma sätt är det viktigt att diffusionen sker på ett sätt så att tidsmedelvärdet blir riktigt. Det illustreras i figur 22.

I figuren har ritats in ett fåtal gasmolekyler av den gas som fastnar på filtret. Om man ser till hur de rör sig så får man en nettotransport in mot filtret. Fyra stycken gasmolekyler är på väg in i burken (provtagaren), se läge I i figuren. Tre stycken är på väg ut! Eftersom molekylerna rör sig med lika stor sannolikhet i alla riktningar kommer en del att röra sig utåt mot den genomsnittliga transportriktningen. Det blir en molekyl ($4-3=1$) netto som rör sig mot

filtret. Om vi går längre in i burken vid läge A så har vi tre stycken som rör sig mot det impregnerade filtret och två som rör sig från. Nettotransporten blir även här en gasmolekyl. Detsamma gäller läge B fast att antalet molekyler minskar hela tiden. Vid filtret rör sig endast en molekyl mot och ingen från. Denna enda gasmolekyl kommer att adsorberas av filtret. Luftmolekylerna absorberas inte på filtret. De rör sig med samma antal in i provtagaren som ut d.v.s. nettotransporten är lika med noll. Vi har alltså ingen egentlig rörelse av luften. Ändå kan man uttrycka provtagningsflödet i ml/min! Det kommer sig av att man jämför den passiva provtagaren med en aktiv. När den passiva provtagaren samlar in gas lika fort som den aktiva så säger man att den provtar luft med ett flöde som är lika med pumpens luftflöde. Man kan säga att det rör sig om ett skenbart luftflöde eftersom luftmolekylerna i genomsnitt står stilla i provtagaren. Det är bara föroreningen som har ett verkligt flöde. Det skenbara luftflödet blir större för en tjock provtagare än en smal och större för en kort än en lång. Om man vill få stora provmängder ska man alltså använda sig av en kort och tjock provtagare. Små lätta gasmolekyler rör sig snabbare än större och tyngre gasmolekyler. Provtagningsflödet beror därför av både den passiva provtagarens utseende och gasen den provtar. Som ett exempel kan nämnas att IVL:s provtagare har ett skenbart luftflöde av cirka 20 ml/min. Det motsvarar en mycket liten, bärbar pump. Provtagning med passiva provtagare sker därför alltid under längre tid än med aktiva. Oftast så tas prov under en månad. Då blir den skenbara volymen nästan en kubikmeter. Ibland kanske man vill mäta koncentrationen i ett litet utrymme som en monter eller en draglåda som



Figur 22. Illustration av hur gasmolekylerna rör sig inuti en passiv (diffusions-) provtagare.



Figur 23. Förvaringsburken med skyddsfiltret och den passiva provtagaren öppnas och provtagaren tas ut.

har mindre volym än den som provtagaren skenbart tar. Då kommer koncentrationen att sjunka så kraftigt i utrymmet att den inte representerar ett utrymme utan provtagare. Provtagaren fungerar alltså som en luftrenare! Det provtagaren mäter blir istället hur mycket gas som produceras i utrymmet. Man kan uttrycka det i $\mu\text{g}/\text{dygn}$.

Så här går provtagningen till

Provtagarna skickas ut i små förvaringsburkar. Normalt används plastburkar, men för organiska syror

används små metallburkar. Huden kan utsöndra ättiksyra så man får inte ta direkt i dessa provtagare utan bör använda plasthandskar. Som en extra säkerhetsåtgärd har man även lagt in ett skyddsfiltret för att inte kontaminera provet.

Öppna burken försiktigt och ta ut provtagaren men låt skyddsfiltret vara kvar i burken (se fig. 23). Stäng därefter locket till burken (med skyddsfiltret i). Provtagaren placeras därefter på lämpligt ställe. Efter avslutad provtagning stoppas provtagaren tillbaks i burken med skyddsfiltret och skickas för analys. Plasthandskar bör användas vid hanteringen.

Bilaga 4. Vad är det för skillnad mellan ppb och $\mu\text{g}/\text{m}^3$?

Av Martin Ferm, Svenska miljöinstitutet AB (IVL)

Förkortningen ppb betyder parts per billion. Det är amerikansk engelska och betyder delar per miljard. 1 ppb låter väldigt lite och är det också. Om man sprutar ut en gas i en ballong under en sekund så måste man sedan späda ut den med luft genom att blåsa med samma flöde i nästan 32 år för att halten i ballongen ska bli 1 ppb! Det är alltså volymsdelar man menar. När det gäller gaser så innehåller en viss volym alltid lika många molekyler om den har en viss temperatur och tryck. En kubikmeter med temperaturen 25°C och normalt lufttryck innehåller alltid 25 000 000 000 000 000 000 000 000 (25 · 1024 = tjugofem miljarder miljarder miljarder) gasmolekyler. Det spelar ingen roll om det är luft eller någon annan gas. Vissa gaser är dock tyngre än andra. Formaldehyd väger lika mycket som luft medan myrsyra och ättiksyra är tyngre än luft. En kubikmeter luft väger 1,2 kg. Eftersom formaldehyd väger lika mycket kommer 1 ppb formaldehyd i en kubikmeter luft att innehålla en 1,2 miljarddels kg formaldehyd, vilket är detsamma som 1,2 miljondels gram. En miljondels gram kallas även ett mikrogram och förkortas μg . Halten 1 ppb motsvarar alltså $1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ när det gäller formaldehyd vid 25°C och normalt lufttryck. 25°C och normalt lufttryck brukar betecknas NTP (normalt tryck och temperatur). På engelska betecknas det STP. Det skriver man ibland inom parentes efter $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Omvandlingstabeller för ppb till $\mu\text{g}/\text{m}^3$ och för $\mu\text{g}/\text{m}^3$ till ppb har konstruerats för formaldehyd, myrsyra och ättiksyra vid rumstemperatur, se tabell 19.

Halten av dessa gaser ligger omkring 1 ppb i stadsluft. Inomhus kan halterna vara flera gånger högre. I slutna utrymmen har vi uppmätt cirka 20 ppb formaldehyd, cirka 50 ppb myrsyra och cirka 60 ppb ättiksyra. Dessa halter ligger under människans luktröskel så man måste därför ta prover på luften för att veta om den är skadlig för de material som förvaras i utrymmet. Skadan orsakas av halten och exponeringstiden. Eftersom kontakttiden med luften kan vara många år i ett museums lager behöver halten inte vara så hög för att orsaka en skada. Ämnen som kommer från utomhusluften kan också skada material. Det är exempelvis välkänt att ozon skadar material som innehåller kolkedjor med dubbelbindningar, som exempelvis gummi. Halten ozon i ett dåligt ventilerat utrymme är obetydlig. Här utgör den dåliga ventilationen ett skydd medan den är en fara för skador från ämnen som avges i rummet eller montern.

Tabell 19. Omvandling av ppb till $\mu\text{g}/\text{m}^3$ och tvärtom för formaldehyd, myrsyra och ättiksyra vid 25°C och normalt lufttryck.

ppb	Formaldehyd HCHO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Myrsyra HCOOH $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Ättiksyra CH ₃ COOH $\mu\text{g}/\text{m}^3$
1,00	1,226	1,880	2,452
2	2,5	3,8	4,9
3	3,7	5,6	7,4
4	4,9	7,5	9,8
5	6,1	9,4	12,3
6	7,4	11,3	14,7
7	8,6	13,2	17,2
8	9,8	15,0	19,6
9	11,0	16,9	22,1
10	12,3	18,8	24,5
15	18,4	28,2	36,8
25	30,6	47,0	61,3
35	42,9	65,8	85,8
45	55,2	84,6	110
55	67,4	103	135
65	79,7	122	159
75	91,9	141	184
85	104	160	208
95	116	179	233

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Formaldehyd HCHO ppb	Myrsyra HCOOH ppb	Ättiksyra CH ₃ COOH ppb
1,00	0,816	0,532	0,408
2	1,6	1,1	0,8
3	2,4	1,6	1,2
4	3,3	2,1	1,6
5	4,1	2,7	2,0
6	4,9	3,2	2,4
7	5,7	3,7	2,9
8	6,5	4,3	3,3
9	7,3	4,8	3,7
10	8,2	5,3	4,1
15	12,2	8,0	6,1
25	20,4	13,3	10,2
35	28,5	18,6	14,3
45	36,7	23,9	18,4
55	44,9	29,3	22,4
65	53,0	34,6	26,5
75	61,2	39,9	30,6
85	69,3	45,2	34,7
95	77,5	50,5	38,7

Figur- och tabellförteckning

Figurer

1. Luftangrepp, affisch av Peter Tillberg. Foto.....	9
2. Blybulla skadad av luftburna organiska syror (a) och blybulla efter konservering (b). Foto.....	11
3. Storleksintervall för olika slags partiklar, mätmetod och motåtgärd.....	13
4. Exponering av provsamlare och metallkupper samt mätning av temperatur och relativ luftfuktighet. Foto.....	16
5. Trämateriäl i museimagasinet. Foto.....	19
6. Resultatet från mätningar av de minsta organiska syrorna.....	19
7. Jämförelse mellan de olika platsernas värden för viktökning på bly och sammanlagda värden för myrsyra och ättiksyra. Varje punkt är en plats.	21
8. Förstöring av del av fig. 7	21
9. Jämförelse mellan värden för viktökning på zink och myrsyra/ättiksyra.....	21
10. Jämförelse mellan värden för viktökning på koppar och myrsyra/ättiksyra.....	22
11. Viktökning för zink, koppar och silver per plats.....	23
12. Klassning av korrosivitet i miljöer enligt ISO 11488.....	23
13. Miljöklasser.....	24
14. Emissionsmätning med FLEC på massivträ. Foto.....	28
15. Kärnved och splintved i furu. Foto.....	31
16. Studerade skivmaterial. Foto.....	32
17. Träskivor. Mätningar av myr- och ättiksyraemissioner efter tre dygn, en månad och sex månader,.....	41
18. Träslag. Mätningar av myr- och ättiksyra emissioner efter en månad och sex månader.....	42
19. Färgbaser. Test 1, mätningar av myr- och ättiksyra emissioner efter två dygn och åtta dygn.	42
20. Oddy-test, efter Myong-Nam Kim.....	43
21. Schematisk skiss över ADSEC-metoden.	44
22. Illustration av hur gasmolekylerna rör sig inuti en passiv (diffusions-) provtagare.	53
23. Förvaringsburken med skyddsfiltret och den passiva provtagaren öppnas och provtagaren tas ut.....	54

Tabeller

1. Luftföroreningar och deras påverkan på olika material.....	12
2. Beskrivning av platserna samt totala mätvärden för myrsyra + ättiksyra.....	18
3. Mätresultat från samtliga platser. Ordade efter fallande blyvikt, se figur 6.....	20
4. Areaspecifika emissioner ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) av flyktiga ämnen från nio träslag efter en respektive sex månader, uppmätta med GC/MS-teknik.....	30
5. Areaspecifika emissioner ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) av små aldehyder och syror från nio träslag efter en respektive sex månader, uppmätta med vätskekromatografi och jonkromatografi.....	30
6. Översikt över provade skivmaterial.....	31
7. Areaspecifika emissioner ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) av flyktiga ämnen från träbaserade skivmaterial efter tre respektive 30 dagar, uppmätta med GC/MS-teknik.....	31
8. Areaspecifika emissioner ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) av små aldehyder och syror från träbaserade skivmaterial efter tre respektive 30 dagar, uppmätta med vätskekromatografi och jonkromatografi.....	33
9. Översikt över undersökta färger och lacker.....	34
10. Areaspecifika emissionsfaktorer ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) för färgproverna 1-8 på glas: Summa alifatiska aldehyder C_3-C_{12} , summa alifatiska karboxylsyror C_2-C_8 och Summa VOC, analyserat med GC-MS-teknik. Korta (C_1-C_2) aldehyder och syror med HPLC resp. jonkromatografi.....	35
11. Areaspecifika emissionsfaktorer ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) för några av färgproverna på träunderlag: Summa alifatiska aldehyder C_3-C_{12} , summa alifatiska karboxylsyror C_2-C_8 och Summa VOC, analyserat med GC-MS-teknik. Korta (C_1-C_2) aldehyder och syror med HPLC resp. jonkromatografi.....	35
12. Skaderisker för kulturföremål.....	37
13. Rekommenderad förvaring.....	40
14. Samband mellan ytans krökningsradie (r) och lägsta relativa fuktighet RH för kondensation (Fyfe 1994:2:31-2:41).	46
15. Karakteristika för ett urval gasformiga luftföroreningar, som medverkar vid atmosfärisk korrosion inomhus; C_1 = typisk koncentration i luften, H_1 = konstanten Henry's lag, c_1 = koncentrationen i fuktfilm på metallytan vid jämvikt (Graedel 1992, Leygraf 1995).....	46
16. Kritisk fuktighet (CH) hos tänkbara korrosionsprodukter.....	47
17. Kritisk fuktighet (CH) för några tänkbara dammkomponenter vid 20°C.....	47
18. Relativ fuktighet (RH) i jämvikt med syra-lösningar i vatten vid 20°C. Referenser för svavelsyra (HBCF) samt för myrsyra och ättiksyra (Sjögren, muntlig uppgift).	48
19. Omvandling av ppb till $\mu\text{g}/\text{m}^3$ och tvärtom för formaldehyd, myrsyra och ättiksyra vid 25°C och normalt lufttryck.....	55

