

# Holdbarhed, pålidelighed og forudsigelse af levetider

**Viden** Ved en konference i Colorado (1) blev der for nylig fokuseret på spørgsmålet om hvorledes lak- og farveindustrien forudsiger sine produkters levetid. Det var den gennemgående opfattelse, at industrien hovedsageligt benytter forældede metodikker i stedet for at udnytte moderne "pålideligheds-teori", som netop har et betydeligt potentiale på dette felt. I denne artikel gennemgår Jon Graystone fordele og ulemper ved begge fremgangsmåder. Hans konklusion er at der er plads til begge metoder; valget afhænger af, hvad man ønsker at få at vide.

Af Jon Graystone  
Paint Research Association, London,  
Teddington



Der er mange gode grunde til, at lak- og farveproducenter ønsker at forudsige levetiden af deres produkter, især når det drejer sig om vejrbestandighed. Motiverne spænder fra omkostningsbevidst produktudvikling til minimering af reklamationer. Maling tjener to primære formål: æstetik og beskyttelse. Brugernes ønske er naturligvis at bevare disse egenskaber så længe som muligt, og med mindst mulig vedligeholdelse. En måde at skaffe sig oplysninger om levetider er udstrakt brug af naturlig eksponering, så vidt muligt under realistiske klimatiske forhold. Metoden er omkostningskrævende og langsommelig - sidstnævnte er især uheldigt når man tilstræber et hurtigt forløb ved produktudvikling, og når det drejer sig om produkter med tilstræbt meget lang levetid. For at afkorte den nødvendige tid til produktudvikling benytter man sig af forskellige kunstgreb:

- accelereret kunstig eksponering
- accelereret naturlig eksponering (for eksempel "Emmaqua")
- ekstrapolering ud fra korttidsundersøgelser
- mekanistiske undersøgelser

Ved alle disse metoder bruger man kvantitative bedømmelser af forskellig art. Det giver mulighed for at anvende statistik og matematisk modellering, men muligheden udnyttes sjældent. Noget andet er, at både industrien og dens afta-

gere er yderst forsigtige med accelererede tests; man stoler mere på naturlig eksponering, uanset problemerne med dårlig reproducerbarhed og repeterbarhed, for slet ikke at nævne at metoden er tidsrøvende. Sammenligner man med andre industrigrene som flyindustri, medikoteknik og elektronik, er det vanskeligt at forestille sig deres vækst hvis ikke de benyttede sig af laboratorieforsøg i udstrakt grad og stolede på resultaterne.

I det følgende resumeres nogle synspunkter om laboratorieforsøg (af malevarer): Zeno Wicks (2) stiller spørgsmålet "Er det bedre at bruge accelererede laboratorietests end slet ingenting?" - og når til følgende konklusion: "Sandsynligvis ikke". Jonathan Martin og hans medarbejdere (3) har følgende kommentar: "I de sidste 80 år har man forsøgt at udvikle og forbedre den traditionelle metodik til forudsigelse af levetider - uden held" - den metodik der henvises til, er sammenligning mellem naturlig eksponering af prøvepaneler og tilsvarende accelererede afprøvningsmetoder, samt antagelser om at malingsystemer kan rangordnes, og at rangordenen kan overføres til andre klimatiske forhold. Naturligvis finder man også udtalelser der støtter en anden opfattelse: "Accelereret ældning er en realitet i dag (...) forudsat at påvirkningerne indbyrdes er afvejet nøje".

Ved accelereret eksponering benyttes ofte en form for velkendt standard - en "intern reference". På den måde får eksponeringsresultaterne relative i stedet for absolutte værdier, og man lægger vægt på rangordenen i stedet for den reelle levetid. Dette forhold er væsentligt når man skal vurdere forskellige metoders fordele og ulemper. Har man tilstrækkeligt store mængder data, kan man bestemme en "accelerationsfaktor" ("shift factor" (5)), for at overføre testresultater til levetider. Når det drejer sig om nye teknologier, er det imidlertid et problem, at man ikke råder over tilstrækkelige mængder data; derudover sker der ikke sjældent det, at produkter "byter plads" (ændrer rangorden) under forskellige klimaforhold eller eksponeringsmetoder; dette forekommer især når produkterne er baseret på bindemidler som afviger kemisk fra hinanden. Den slags ændringer i rangorden - reelle eller tilsyneladende - udgør den væsentligste udfordring ved udvikling af accelererede testmetoder. Blandt de øvrige vanskeligheder ved levetidsundersøgelser kan man nævne en række punkter:

- I praksis nedbrydes malinger uhyre forskelligt, og nedbrydningsfænomenerne er ofte ikke-normalfordelte.

- Fejl i begyndelsen af et produkts levetid vil ofte have større betydning i praksis end dets gennemsnitlige levetid.
- Påvirkningerne ved naturlig eksponering er ikke reproducerbare.
- Påvirkningerne – både ved naturlig og kunstig eksponering – er vanskelige at kvantificere
- Levetidsdata afhænger af mange forskellige påvirkninger
- Det er ikke logisk at forvente samme rangorden mellem produkter med indbyrdes forskellig kemisk sammensætning, når de udsættes for forskellige typer påvirkning, uanset om påvirkningen stammer fra naturlig eller kunstig eksponering.

De enkelte punkter kommenteres nedenfor:

I praksis nedbrydes malinge uhyre forskelligt, og nedbrydningsfænomenerne er ofte ikke-normalfordelte. Ved alle prøvninger forekommer der spredning af resultater. Sommetider betegnes fænomenet "fejl", men det er mere korrekt at tale om tilfældige eller systematiske variationer som kan hidrøre fra mange forskellige kilder, eksempelvis fra underlaget, påføringen, lagtykkelsen osv. Dertil må lægges den uundgåelige variation i eksponeringsbetingelser, som især er betragtelig ved naturlig eksponering. Imidlertid har det vist sig ved ringforsøg, at der også forekommer betydelige variationer ved kunstig laboratorieeksponering fra ét laboratorium til et andet.

At levetidsdata ofte ikke er normalfordelte er et andet karakteristisk træk. Alternative fordelings typer som "gammafordeling" eller eksponentialfordeling passer måske bedre. Som beskrevet senere har den såkaldte "Weibull-fordeling" vist sig at være specielt egnet til levetidsstudier.

*Fejl i begyndelsen af et produkts levetid vil ofte have større betydning i praksis end dets gennemsnitlige levetid.*

Visse typer fejl forekommer sporadisk i løbet af en lang periode. Det gælder for eksempel revnedannelse og blæredannelse. Den type fejl er vanskeligere at analysere end fænomener som glansændring, der udvikler sig gradvis med tiden. Små forskelle i tidligt forekommende fejl kan være vanskelige at bedømme ved en test, men i praksis kan de have alvorlige økonomiske konsekvenser (eks. ved reklamationer) – også selv om der ikke er væsentlige forskelle i de tilsvarende gennemsnitlige levetider. I en nyligt publiceret artikel redegør Bauer (7) for den betydelige variation i de påvirkninger, der forekommer under eksponering under naturlige forhold. Konsekvensen er, at man ville være nødt til at benytte meget langvarige naturlige eksponeringer hvis man totalt ville undgå tidligt forekommende fejl. Dette er et af de væsentligste argumenter for at tage moderne pålidelighedsteori i brug.

*Påvirkningerne ved naturlig eksponering er ikke reproducerbare*

Selv i veletablerede afprøvningsområder som for

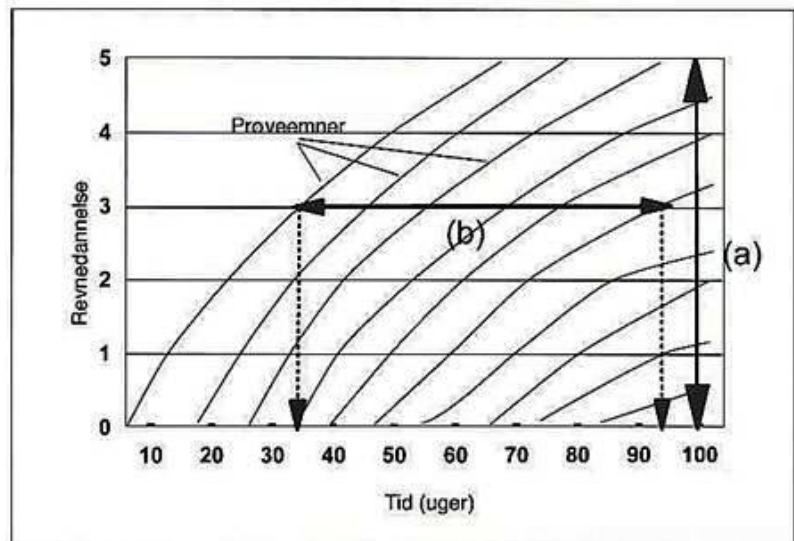


Fig. 1. Sammenligning mellem traditionel behandling (a) af afprøvningsresultater og moderne pålidelighedsteori (b). I et tænkt eksempel eksponeres 10 paneler. Udviklingen i revnedannelse følges og bestemmes efter en skala 0-5 (0 er bedst). Ved traditionel bedømmelse er resultatet middeltallet af vurderingerne for eksempel efter to år. Ved pålidelighedsteori opgør man i stedet eksponeringstiden indtil et forud fastsat acceptniveau – i eksempel er værdien sat til tre. Ved pålidelighedsteorien får man i det aktuelle eksempel de første informationer fra afprøvningen allerede efter 35 uger – modsat 104 uger for den traditionelle fremgangsmåde. Til gengæld forudsætter afprøvning efter pålidelighedsteorien et større antal prøveemner.

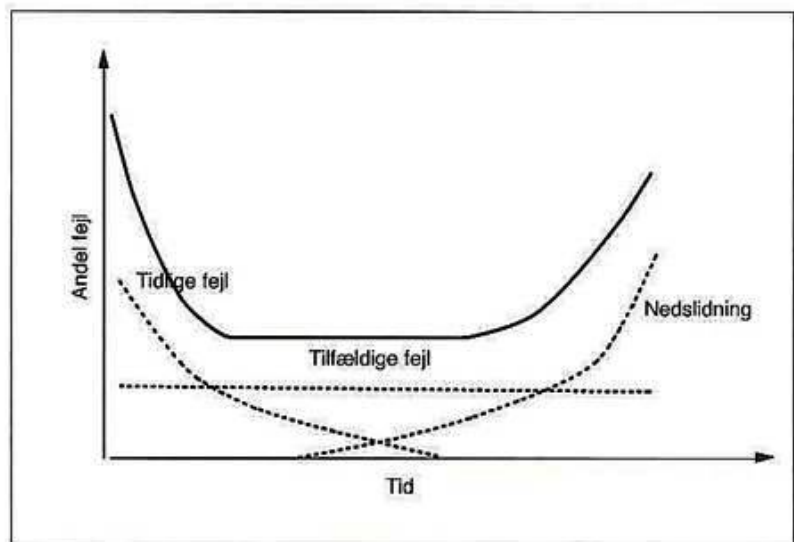


Fig. 2. Pålidelighedsfunktionen angiver andelen af fejl i forhold til tiden. Kurven består af tre afsnit, og har form som et "badekar". Weibull-funktionen kan tilpasses til de tre stadier: 1) Tidligst forekommende fejl, 2) tilfældige fejl og 3) fejl efter nedslidning (Børnedødelighed, dødsfald efter tilfældige årsager, dødsfald på grund af alder).

**DEV DEVILBISS**

**AUTOMOTIVE REFINISHING PRODUCTS**



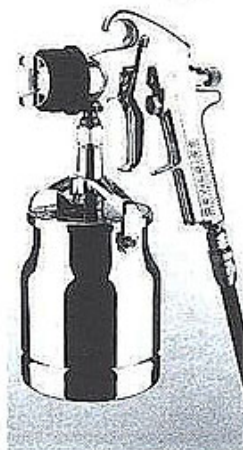
**DEVILBISS  
RANSBURG**

**INDUSTRIAL COATING EQUIPMENT**



**Mere end 100 års erfaring inden for sprøjteudstyr. For alle typer overfladebehandlingsudstyr, manuel såvel som automatisk.**

- **HVLP**
- **EL. STAT**
- **AIR ASSISTED**
- **AIRLESS**
- **KONVENTIONEL**
- **2 - K**



**e Enterprise**  
Danmark

**Hejreskovvej 18 C st tv, 3490 Kvistgård**

**Tlf.: 49 13 93 00  
Fax : 49 13 93 13**

eksempel Florida må man se i øjnene, at de klimatiske påvirkninger ikke er ens fra ét tidspunkt til et andet. I mange tilfælde kan man slet ikke definere en cyklus, som gentager sig fuldt ud indenfor et overskueligt tidsrum. Konsekvensen er, at resultaterne af naturlig eksponering kun kan tolkes hvis man på én eller anden måde kan kvantificere påvirkningerne under eksponeringen (indstrålet solenergi, nedbør osv.). Man må se i øjnene, at man ikke kan etablere en korrelation mellem naturlig eksponering og kunstig eksponering så længe man ikke engang "kan korrelere naturlig eksponering med naturlig eksponering".

*Påvirkningerne - både ved naturlig og kunstig eksponering - er vanskelige at kvantificere.*

Dette - at kvantificere påvirkningerne under naturlig eksponering - er imidlertid ikke blot et spørgsmål om at registrere meteorologiske data. Det drejer sig snarere om at vurdere den ændring der sker med et eksponeret emne under eksponeringen. Et eksempel er temperaturens afhængighed af kuløren; et mørkt prøvepanel vil blive varmere i solen end et lyst. På samme måde er det nødvendigt at tage malingers spektrale absorption i betragtning. De bølgelængder, der ikke absorberes er ganske enkelt ikke relevante. En anden interessant størrelse er overfladernes "vådtid" ("time of wetness"). Når overflader er våde skyldes det ikke nødvendigvis regn, årsagen kan ligeså godt være kondensdannelse. Først når man har taget alle den type forhold i betragtning bliver det muligt at udarbejde modeller, der kan forklare hvorfor to malinger med forskellig kemisk sammensætning bytter rangorden under forskellige klimaforhold.

*Levetidsdata afhænger af mange forskellige påvirkninger.* Set fra en forbrugers synspunkt kan en maling fejle på mange forskellige måder; den kan ændre udseende (skifte kulør eller glans), eller nedbrydes på mere dramatisk vis med revnedannelser, blærer eller tilsvarende. Det nedbrydningsfænomen, der forekommer først, kommer til at dominere indtrykket. Når det drejer sig om nyudviklede produkter (ny teknologi) er det særdeles kompliceret at forudsige hvilke fænomener, der kommer til at dominere; og sandsynligvis vil det være nødvendigt at opstille forskellige modeller for at forudsige forskellige typer nedbrydning. Endelig må man erindre, at nedbrydningsfænomener kan tilskrives et væld af forskellige faktorer, herunder udformning, konstruktion, fremstillingsproces, påføring, materialer, formulering og det omgivende miljø.

*Det er ikke logisk at forvente samme rangorden mellem produkter med indbrydes forskellig kemisk sammensætning, når de udsættes for forskellige typer påvirkning, uanset om påvirkningen stammer fra naturlig eller kunstig eksponering.*

Når man udarbejder metoder til kunstig, accelereret ældning, tilstræber man så god korrelation som muligt - helst lineær - med naturlig eksponering. I nogle levetidsundersøgelser søger man tilsyneladende stadig efter de vises sten, i form af den perfekte, universelt anvendelige laboratoriemetode. Ovenfor er der redegjort for, hvorfor dette er et uopnåeligt mål, en kendsgerning der kun alt for



godt bekræftes af praksis.

Det er en almindeligt udbredt forenkling eller misforståelse, at man kan fremskynde nedbrydningsprocesser ved at intensivere forskellige påvirkninger - for eksempel hæve temperaturen. Imidlertid kan der lige så vel ske det, at der starter helt andre typer nedbrydningsprocesser, når man overskrider bestemte tærskler; konsekvensen er et nedbrydningsforløb, som måske slet ikke ligner virkeligheden.

#### Matematiske aspekter

Når man skal tolke resultater fra naturlig eksponering og fra accelereret, kunstig eksponering må man opstille én eller anden form for matematisk model. Man kan benytte modeller baseret alene på forsøg (empiriske modeller), statistiske modeller eller komplette fysiske modeller. Somme tider er det de indsamlede data, der afgør valget af analysemodel, men ofte er det omvendt, idet det er den valgte analyseteknik, der afgør hvilke data der skal indsamles. Eksempelvis kræver modeller baseret på pålidelighedsteori, at der eksponeres et større antal emner end det er normalt ved traditionelle levetidsundersøgelser; emner udtages så til undersøgelse med bestemte mellemrum i stedet for at man eksponerer alle emner i en fastlagt periode (se fig. 1).

Ved analyse af forsøgsresultater og ved opstilling af matematiske modeller benytter man sig af forskellige metoder:

- Statistik og forsøgsplanlægning
- Regression
- Ikke-parametrisk statistik
- Tids-serie forudsigelser
- Pålidelighedsteori
- Fejlteori

#### Statistik og forsøgsplanlægning

Statistik og forsøgsplanlægning er de helt overordnede begreber. Denne artikel kan ikke give en udtømmende beskrivelse af alle statistiske discipliner, læs evt. nærmere i (8). I statistik forekommer spredning på resultater - eksempelvis angivet ved standardafvigelsen; spredningen skal tages i betragtning når man sammenligner resultater. Ved eksponering er der det særlige problem, at resultaterne ofte ikke er normalfordelt, samt at spredningen er høj. Den store spredning betyder at man må benytte mange gentagelser (mange forsøgspaneler) selv om man kan reducere deres antal noget ved hensigtsmæssig forsøgsplanlægning. I mange undersøgelser benytter man imidlertid for få forsøgspaneler; konsekvensen er at man kun er i stand til at skelne meget betydelige forskelle med rimelig sikkerhed.

Det er ikke altid klart fra begyndelsen, hvilken statistisk metode der skal benyttes når resultaterne skal vurderes. Når man skal opstille en model må man erindre sig at "det er bedre, når resultaterne passer dårligt med en velvalgt model end når de passer godt til en forkert model" (8). Det er altså ikke sandsynligt, at en model som giver god overensstemmelse med et sæt resultater, er generelt anvendeligt. Dette gælder i særlig høj grad hvis man



## OPCO Sprøjteudstyr Tysk kvalitet-Rustfrit stål

- Airless
- Air- Combi
- 2-Komponent
- Lavtrykspumper
- Membranpumper
- Transportpumper
- Lakvarmer
- Automatpistoler
- Lakventiler



## ASM Dysesystem

- Vendedyser
- Dyseforlænger
- Airless-pistoler



Castor teknik ApS  
Metalgangen 9 -11 C  
2690 Karlslunde  
Tlf. 46 15 16 54  
Fax 46 15 16 94



## REVOLUTION:

- Brennierteknik
- Høj gennemløbshastighed
- Én kabine - 2 sidedet lakering
- Ingen pistoler
- Lagtykkelse: 40-250µm



**Påføring af pulver uden brug af pistoler!**

D3 System ApS, Marielundvej 37 C, 2730 Herlev  
Tlf.: 44 53 47 53 • Fax: 44 53 27 53



forsøger at lade modellen afspejle de processer, der ligger til grund for resultaterne; "over-tilpasning" er et hyppigt problem ved regressionsanalyser.

Regressionsanalyse er én blandt mange metoder til at undersøge sammenhængen mellem to variable; den benyttes ofte ved eksponeringsundersøgelser til at sammenligne naturlig og kunstig eksponering. Ved mange regressionsanalyser antager man at der består en lineær sammenhæng. Ofte gør man tillige andre antagelser, for eksempel at spredningerne på resultaterne er normalfordelte, at fejlene er indbyrdes uafhængige, og at de i gennemsnit giver nul (ophæver hinanden). Hvis disse forudsætninger ikke stemmer, skal man være forsigtig. Det gælder også når man sammenligner korrelationskoefficienter, for gør man det, er det en forudsætning, at der findes en lineær sammenhæng. En høj korrelationskoefficient er ingen garanti for at resultaterne kan benyttes til forudsigelse af levetider, for forudsigelsen holder ikke stik, hvis den pågældende sammenhæng ikke er lineær. Der findes fremgangsmåder til vurdering af residualfejle, som kan være en hjælp til at afsløre, at den pågældende sammenhæng er ikke-lineær.

#### *Ikke-parametrisk statistik*

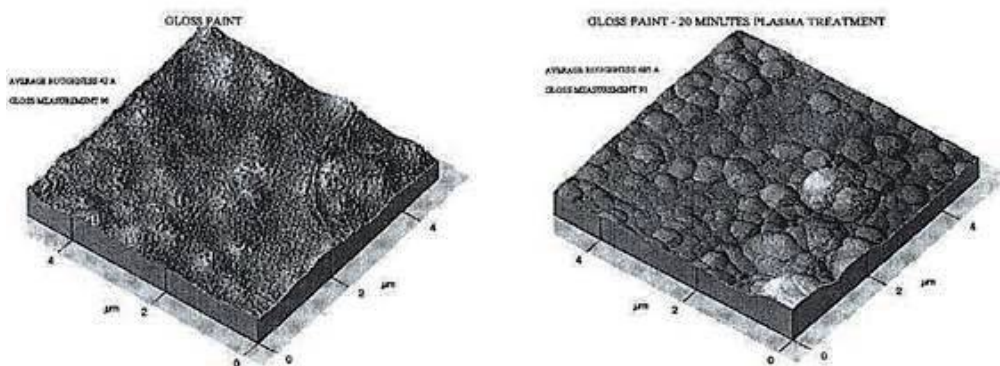
Ikke-parametriske tests stiller ikke så store krav til fordelingen af resultater (for eksempel forudsætninger om normalfordeling). Metoderne benyttes typisk til rangordning af forskellig art, for eksempel "Spearman's rank correlation" og "Wilcoxon's rank test". Med tabelværdier for korrelationskoefficienter kan man afgøre om to

variable er korrelerede, men man kan ikke afgøre hvor godt. Ikke-parametriske testmetoder benyttes i levetidsundersøgelser til at sammenligne et givet produkt med en kendt reference; det er stadig nødvendigt at benytte mange gentagelser, hvis man skal konkludere med nogenlunde sikkerhed, men i følge Fischer og Ketola (9) kan metoderne kombineres med variansanalyse, hvorved reproducerbarheden forbedres.

#### *Tids-serie forudsigelser*

Grundlaget for denne type undersøgelser er målinger af bestemte egenskaber i løbet af en tidsperiode. Den type undersøgelser benyttes traditionelt til økonomiske forudsigelser, og eftersom eksponering også er en form for tids-serie undersøgelser har flere forfattere gjort opmærksom på de muligheder, denne teknik rummer. Ved normal regressionsanalyse antager man at målingerne over tid er indbyrdes uafhængige, men dette holder som bekendt ikke stik ved nedbrydning af maling (tænk for eksempel på en egenskab som glanstab), hvor ét måleresultat tydeligvis afhænger af den forrige værdi; rækkefølgen af målinger er altså afgørende. Det viser sig, at residualfejlene inden for en tids-serie er korrelerede, og dette kan benyttes matematisk til at undersøge måleresultater. En tids-serie kan udvise sæsonmæssige udsving, cykliske ændringer, langtidstendenser, og har endelig tilfældige udsving. Skal man forudsige én eller anden fremtidig værdi for en egenskab, må man tage udgangspunkt i de tidligere målte værdier.

I den såkaldte "Random walk" model indgår tidligt målte værdier med samme vægt som re-



**AFM-mikroskopi er en teknik, som giver detaljeret information om overfladers struktur. Her er den benyttet til at vurdere en alkydemalje før og efter kunstig eksponering i plasma. Plasma-ætsningen frigør pigmentkorn, og det kan både ses på billedet (th) og aflæses af ruheden. Derimod afsløres den begyndende nedbrydning ikke af traditionel glansmåling**





sultater fra et senere tidspunkt, og metodens præcision til at forudsige fremtidige værdier afhænger af kvadratroden af tiden. Men ved eksponering må man tage hensyn til de tidligere målte værdier for en række egenskabers vedkommende, og i stedet for kvadratroden af tiden burde man formentlig snarere benytte sig af én eller anden form for vægdet gennemsnit. Hvis der er store sæsonmæssige udsving – og det er tilfældet ved naturlig eksponering – kan man "sæsonkorrigere" måleresultaterne – i hvert fald principielt. Imidlertid varierer påvirkningerne under eksponering ikke efter et helt fast skema. Det betyder, at tids-serien afhænger af start-tidspunktet. For at normalisere resultaterne til et tænkt fælles udgangspunkt benyttes en teknik, hvor man beregner et "glidende gennemsnit" for måleresultaterne. "ARIMA" (Auto Regressive Integrated Moving Average) er et produkt af disse teknikker, og "Box & Jenkins" fremgangsmåde er en af de kendteste versioner (10).

#### *Pålidelighedsteori*

Pålidelighedsteori indgår rutinemæssigt ved kvalitetskontrol og processtyring; i levetidsundersøgelser forbindes metoden med vurdering af levetider og tid indtil sammenbrud. Teknikken finder så småt anvendelse i lak- og farveindustrien, men er allerede veletableret i andre brancher; udmattelsesprøvning af materialer og klebestoffer er typiske eksempler. I princippet kan man bestemme fordelingen over et produkts levetid ved at eksponere et antal paneler og så registrere tiden indtil man når et forud defineret kassationsniveau. Problemer er at nogle paneler er meget længe om at nå kassationsgrænsen, især hvis påvirkningerne er moderate. Man kan derfor blive nødsaget til i stedet at standse afprøvningen efter en fastsat tid eller når et aftalt antal emner har nået kassation. De emner, som ikke har overskredet kassationsgrænsen har "bestået". Nøglen til pålidelighedsteoriernes anvendelse er fordelingen over produktets levetid; fra den kan man aflede andre nyttige størrelser såsom fejlfrekvens, overlevelsesfunktion, fejlfrekvens, og den gennemsnitlige tid indtil fejl. Der er ingen enkle metoder til at forudsige arten af fordelingen over produktets levetid; den forventede nedbrydningsmekanisme kan dog sommetider give et fingerpeg. Halvlederkomponenter følger eksempelvis typisk en logaritmisk normalfordeling. En af de hyppigst anvendte fordelinger er den såkaldte Weibull-fordeling, som er en form for eksponentialfordeling:

$$R(t) = e^{-((t/t_0)/\alpha)^\beta}$$

hvor  $R(t)$  er overlevelsesfunktionen dvs. det antal emner, som har klaret testen til et givet tidspunkt ( $t$ ) divideret med det samlede (op-rindelige) antal emner.  $\alpha$  og  $\beta$  er konstanter (størrelsesfaktor og formfaktor),  $t$  er tiden, og  $t_0$  er en konstant der fastlægger fordelings udgangspunkt.

Weibull-fordelingen er meget anvendelig,

formfaktoren ( $\beta$ ) betyder, at formlen kan tilpasses mange forskellige fordelingsfunktioner. Man kan også udlede fejlfrekvensen og fejlfrekvenshastigheden af formlen. Der findes specielt "Weibull-papir", hvor indtegnede data danner rette linier og giver mulighed for enkle skøn. Man har dog fortsat brug for almindelige statistiske metoder til at bestemme konfidensintervaller. Sluttelig må man gøre sig klart, at forsøgsplanlægningen afviger fra traditionel statistisk forsøgsplanlægning.

Fejlfrekvenshastigheden for malede paneler kan ofte beskrives ved en sammensat kurve, som har en vis lighed med menneskeliv: en indledende fase med relativt høj risiko (børnedødelighed) fulgt af en lang periode med få tilfældigt fordelte udfald, og endelig en afsluttende fase med tiltagende frafald på grund af nedslidning (alderdom). På grund af sin form betegnes denne type kurve ofte som "badekarsformet". Pålidelighedsundersøgelser kan koncentrere sig om en del af dette kurveforløb, og enten være "probabilistiske" eller "deterministiske". Probabilistiske metoder er ofte funderet på erfaringstal – historiske værdier; de kan benyttes til at forudsige levetider for sammensatte systemer, for eksempel militære køretøjer, og danner grundlag for mange specifikationer. Med deterministiske metoder søger man at forklare eller forstå hvilke processer der udgør årsagerne til sammenbrud, igen med det mål at foretage forbedringer

#### *Fejlteori*

De tre mest almindelige modeller er Arrhenius, Eyring og eksponentialfunktioner. Arrhenius-ligningen er velkendt blandt kemikere, den beskriver temperaturrens indflydelse på et procesforløb. Man kan bruge den til at bestemme aktiveringsenergien for den pågældende proces ved at afbilde data fra forsøg udført ved forskellige temperaturer. Arrhenius-modeller kombineres ofte med Weibull-fordelingen (se for eksempel Schutyser and Perera, Double Liason Nr. 479-80 fra 1996). I den nævnte artikel er der fundet god overensstemmelse for et malemateriale med høj  $T_g$  (glasovergangstemperatur).  $T_g$  er formentlig en væsentlig størrelse, idet der kan forekomme forskellige nedbrydningsmekanismer over og under denne temperatur; når man udfører forsøg, skal man derfor holde sig inden for ét af områderne. Ulemper ved Arrhenius model er, at den kun omfatter én påvirkning (temperaturen). Eyrings model medtager endnu en påvirkning ud over temperaturen. Den kan således anvendes til modeller der for eksempel omfatter både temperatur og fugtighed. Eksponentialfunktioner benyttes ofte til test af computerchips.

I en artikel af Bauer (7) vises det, hvorledes en fordelingsfunktion kan kombineres med en model med fysiske elementer.

#### **Diskussion og konklusion**

Når Martin et al (3) kritiserer traditionelle eksponeringsforsøg, er det ikke uberettiget. Lak-

og farvefabrikkerne bruger stadig megen tid på at vurdere levetiden af nye produkter, og bedømmelserne er forbundet med stor usikkerhed i form af betydelig variation i testresultater, og ikke engang rangordenen mellem produkter er den samme fra det ene eksponeringssted til det andet. Pålidelighedsteori er imidlertid også udskrævende, og metoden er på ingen måde et universalmiddel. Både traditionelle metoder og forsøg baseret på pålidelighedsteori stiller krav om omhyggelig forsøgsplanlægning, og om beregning af konfidensintervaller. Valget af metode afhænger i høj grad af, hvad det er, man ønsker at få svar på. Hvis man skal sammenligne produkter med ensartet og velkendt sammensætning, kan man få meget sikre resultater ved parametriske rangordningsforsøg. Hvis man imidlertid ønsker oplysninger om levetider, og især om evt. tidligt forekommende fejl ved nyudviklede produkter, så har pålidelighedsteoriens metoder meget at tilbyde.

Metoder baseret på pålidelighedsteori kan udmærket benyttes ved vurdering af traditionelle eksponeringsforsøg under naturlige klimaforhold, men teorierne kan også finde anvendelse på accelereret prøvning; eksempelvis er kombinationer som den nævnte Arrhenius-Weibull model særdeles velegnet til at behandle komplekser af påvirkninger som temperatur, energiindstråling, vådtid osv. og deres effekt på filmegenskaber som glans- og kulørændring, revnedannelse osv. Det er en forudsætning, at påvirkningerne kan kvantificeres for hvert eksponeret panel; det er ikke tilstrækkeligt med generelle oplysninger om temperatur og indstråling.

For accelereret afprøvning under laboratorieforhold bør man snarere opstille modeller ved at variere eksponeringsbetingelserne systematisk indenfor en realistisk ramme end at søge efter korrelation mellem et fastlagt sæt af kunstige eksponeringsbetingelser på den ene side og naturlig eksponering på den anden.

Til sidst bør det nævnes, at der – uanset eksponeringsmåde – er udviklet et stigende antal meget følsomme metoder til at studere overfladers nedbrydning, og til at karakterisere overflader: Atomic Force Mikroskopi, FT-IR analyse etc. Disse metoder kan bruges til mekanistiske undersøgelser og til at finde tidlige tegn på nedbrydning før de kan observeres med det blotte øje. Mange af disse teknikker benyttes allerede til levetidsundersøgelser, og man må håbe at lak- og farveindustrien hermed er på vej mod en æra af ny erkendelse.

#### Litteratur:

1. Systems Approach to Service Life Prediction of Organic Coatings. Breckenridge, Colorado 14.-19. september 1997 (artiklerne udsendes af Polymeric Materials Science and Technology of the American Chemical Society i løbet af i år).
2. Wicks Z. Organic Coatings, Volume 2. John Wiley & Sons, New York 1994 (ISBN 0-471-59893-3).
3. Martin J W et al. Methodologies for Pre-

dicting the Service Lives of Coating Systems. Federation Series on Coatings Technology. FSCT, Juni 1996 (eller NIST Building Science Series 172, 1994).

4. Gross G W. Correlation of Laboratory to Natural Weathering. Journal of Coatings Technology. Volume 49, Nr 633, oktober 1997).
5. Simms J A. Acceleration Shift Factor and its use in Evaluating Weathering Data. Journal of Coatings Technology, Volume 59, nr. 748, maj 1987, 45-53.
6. Fischer R M, Ketola W D, Murray W P. Inherent Variability in Accelerated Weathering Devices. Prog. Org. Coatings, 19: 165-179 1991 a.
7. Bauer D R. Predicting In-Service Weatherability of Automotive Coatings: A New Approach. Journal of Coatings Technology, Volume 69, nr. 864, januar 1997.
8. Chatfield C. Problem Solving: A Statistician's Guide. Udsendt af Chapman & Hall, 1988.
9. Fischer R M, Ketola W D. The Impact of Recent Research on the Development and Modification of ASTM weathering Standards. Durability Testing of Nonmetallic Materials. ASTM STP 1294, 1996.
10. Rehfeldt T K. Evaluation of Degradation Data by Time Series Analysis. Prog. org. Coatings 15 /1987) 261-268.
11. Schutysen P, Perera D Y. Statistical Evaluation of Accelerated Weathering Data. Double Liaison, nr. 479-480, 1996.
12. A fundamental Approach to Durability Prediction. Paint Research Association Project DURA (<http://www.pra.org.uk>).

Oversættelse: Peter Svane

## Durability, Reliability and Service Life Prediction

■ The conventional approach to testing of coating durability by means of natural exposure trials and evaluation of test results by traditional statistics is challenged these years by advanced laboratory methods and by modern reliability theory.

Jon Graystone reviews some of the advanced statistical methods stating their advantages and shortcomings. He concludes that the time for product development in the coatings industry may be shortened by application of modern test methods and modern statistics. The demand for proper experimental design however is not reduced, and the requirement for large series of exposure panels may even be increased.

