

Belægningens overfladetemperatur ved kunstig vejrpåvirkning: Temperaturen betydning for den forventede levetid

Af Florian Feil og Artur Schönlein, Atlas Material Testing Technology GmbH, og Matthew McGreer, Atlas Material Testing Technology LLC

Indledning

Overfladetemperaturen på et prøveemne der bestråles med naturligt sollys eller kunstigt xenonlys, påvirkes ikke kun af miljøet men også af prøveemnets specifikke materialeegenskaber, fx farven. Hidtil har det i forbindelse med vejrpåvirkningstest været upraktisk at foretage en direkte måling af prøveemnets overfladetemperatur. Eksperimentatorer har primært foretaget en estimering af prøveoverfladetemperaturer ud fra målinger taget med referencetermometre, såsom isolerede sorte standardtermometre eller uisolerede BPT-termometre (black panel), der kan vise, men ikke altid gør det, den højeste temperatur en overflade kan opnå ved bestråling i et specifikt miljø.

I en vejrpåvirkningstest kan et unøjagtigt skøn af den reelle prøvetemperatur have stor betydning for evalueringen af prøvens ældningsadfærd. Når man kender prøveemnets faktiske overfladetemperatur, kan man foretage en mere præcis sammenligning mellem effekterne af forskellige vejrforhold (fx naturlig kontra kunstig vejrpåvirkning, eller to prøveemner i forskellige farver). Det vil desuden være muligt at justere testparametrene for kunstige vejrpåvirkningscyklusser iht. specifikke prøvekarakteristika, fx glasovergangstemperatur.

Denne artikel beskriver hvordan kontaktfri temperaturmåling kan implementeres i kunstig vejrpåvirkning for at opnå mere detaljeret information om den faktiske overfladetemperatur under eksponeringen. Metoden kan fx bruges til at bestemme aktiveringsenergiene for fotokemiske nedbrydningsprocesser, som kan føre til gulning, falmning eller andre ændringer i prøvernes materialeegenskaber. At kende og tage højde for den specifikke prøvetemperatur fører til mere præcise estimeringer af brugslevetiden – og, i sidste ende, en bedre forståelse af kunstig vejrpåvirkning.

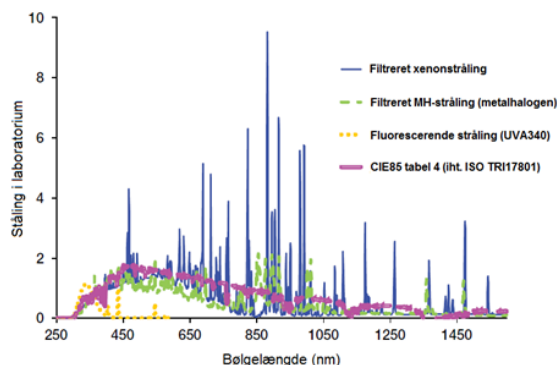
Strålingsrelateret temperaturstigning

Solstråling på polymere materialer

Det naturlige sollys der absorberes af polymere materialer får overfladetemperaturen til at stige til over rumtemperatur. Selv om alle betingelser (prøveemnets isolering, tykkelse, geometri og retning, klimaforhold som fx vindhastighed osv.) er de samme, kan overfladetemperaturer variere. Overfladetemperaturen afhænger primært af andelen af absorberet stråling [1, 2, 3]:

$$S_{ABS} = \int E_{e\lambda}(\lambda) \cdot \alpha_{ABS}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (\text{Ligning 1})$$

hvor S_{ABS} er den totale absorberede stråling, $E_{e\lambda}$ er den spektrale irradians og α_{ABS} er den bølglængdeafhængige spektrale absorption.



Figur 1: Laboratorielyskilder til simulering af naturlig solstråling sammenlignet med referencen-solen (CIE85, tabel 4 - ISO TR 17801); skaleret efter ISO TR 18486 i bølglængdeområdet fra 300 nm til 400 nm.

Fotokemiske nedbrydningsprocesser igangsættes på basis af materialets spektrale følsomhed, primært som følge af UV eller synlig stråling [4]. Hastigheden af de kemiske reaktioner er næsten altid temperaturafhængig. Hvad angår de fotokemiske nedbrydningsprocesser forårsaget af sollys, er det prøveemnets overfladetemperatur der er relevant.

Simuleret solstråling på polymere materialer

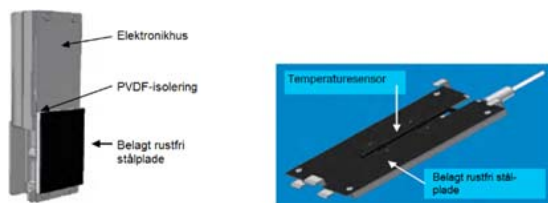
Ligning 1 gælder for naturligt og simuleret sollys. Overfladetemperaturen er baseret på den absorberede stråling (S_{ABS}) fra den pågældende strålingskilde. Filteret xenon- og metalhalogenlys kan producere overfladetemperaturer lig dem der forekommer under eksponering for sollys (absolutte temperaturer, temperaturforskelle). Andre kunstige lyskilder

(fx udladningslamper med UV fluorescerende gas) forårsager temperatureffekter på overfladen som ikke kan sammenlignes med effekterne af sollys (temperaturer som er for lave eller for høje; lille eller ingen temperaturforskul mellem forskellige prøver) [1]. Dette skyldes den kunstige lyskildes spektrale energifordeling (se eksempler på figur 1).

Måling af overfladetemperatur

De enkelte prøveemner kan have lidt forskellige temperaturer (se [1, 2, 3]). Det kan være vanskeligt at måle overfladetemperaturer direkte under en test med naturlig og kunstig vejrpåvirkning da det kræver at man ekskluderer strålingens påvirkning af selve temperaturføleren. Derfor er det i dag almindelig praksis i forbindelse med vejrægthedstest at foretage en estimering af prøvens overfladetemperatur på basis af den omgivende lufttemperatur i prøveammeret, eller ved at bruge temperaturen på en jævn hvid overflade som en nedre reference og temperaturen på en jævn sort overflade som en øvre reference. Disse referencetemperaturer er væsentligt nemmere at måle under testforløbet. Det antages at den faktiske prøvetemperatur ligger et sted imellem disse to grænser eller tæt på referencetemperaturerne.

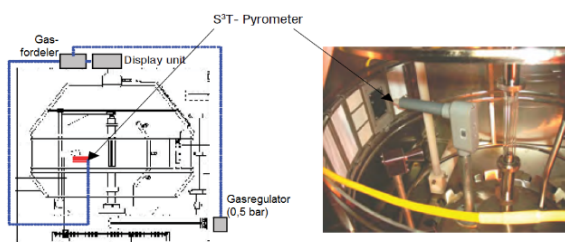
Der er forskellige versioner af redskaberne til måling af referencetemperatur, fx BST-termometre (sort standard) og BPT-termometre (sort plade), som dem der ses på figur 2, samt WST-termometre (hvid standard) og WPT-termometre (hvid plade). Disse følere beskrives i forskellige standarder (fx ISO 4892-1, ISO 16474-1 og ASTM G151). Systematiske forskelle mellem forskellige følertyper kan dog give unøjagtige resultater.



Figur 2: Eksempel på et BST-termometer (belægningen er isoleret på bagsiden) og et BPT-termometer (bagsiden af belægningen er isoleret)

For nogle år siden introducerede man en ny teknologi til direkte måling af overfladetemperaturen i et apparat til vejrpåvirkning [5]. Ved denne metode udstyres apparatet med et pyrometer, der måler varmestrålingen fra prøveemnerne (se figur 3). Temperaturen registreres mens prøverne roterer forbi pyrometret. Pyrometret har følgende karakteristika:

- Temperaturområde fra -20 °C til 150 °C (sporbar kalibrering ved hjælp af sort legeme-stråling).
- Spektralområde fra 8 µm til 14 µm.
- IR-søjledetektor af silikone.
- Nøjagtighed (i temperaturområdet af vejrægthedstest): 0,6 %.
- Målepunkt (diameter): 30 mm.



Figur 3: Pyrometer i et apparat til vejrpåvirkning bruges til at måle overfladetemperaturen på de eksponerede prøveemner. Temperaturen registreres mens prøverne roterer forbi pyrometret.

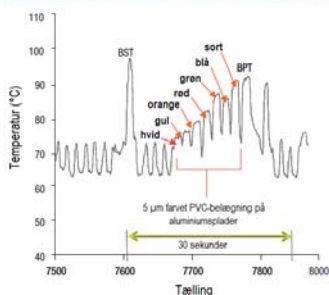
Temperaturen på et givet objekt kan kun måles nøjagtigt hvis emissionsfaktoren (ϵ) ligger i bølglængdeområdet mellem 8 µm og 14 µm, og pyrometret justeres i henhold til dette. Emissionsfaktoren er kvotienten mellem den stråling der udsendes af et særligt prøveemne, og den stråling der udsendes af et ideelt sort legeme med samme temperatur. Et ideelt sort legeme har emissionsfaktoren $\epsilon = 1$, og et perfekt termisk spejl har emissionsfaktoren $\epsilon = 0$. Et reelt objekts emissionsfaktor er altid mindre end 1. For de fleste organiske materialer er $0,85 < \epsilon < 0,95$ det mest almindelige. Tabel 1 viser emissionskoefficienter for en række typiske materialer.

Materiale	ϵ
Polypropylen	0,97
Høvlet træ	0,86-0,90
Sorte polymerer	0,85-0,95
PVC	0,90-0,93
Gummi	0,95-0,97
Krydsfinér	0,83-0,98
Maling	0,86-0,95

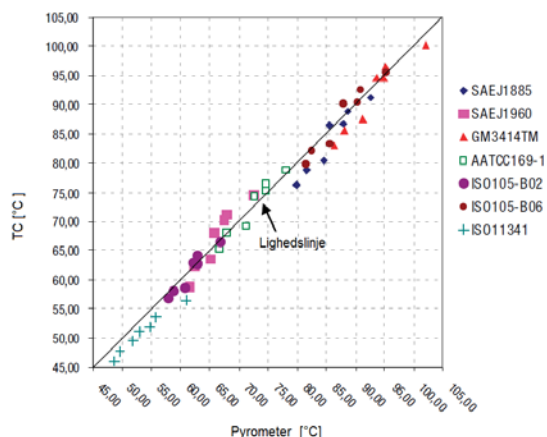
Tabel 1: Eksempler på emissionskoefficienter i bølglængdeområdet fra 8 µm til 14 µm (se også [5, 6]).

Figur 4 illustrerer en måling af overfladetemperaturen på farvede PVC-belagte 1 mm tykke aluminiumsplader i et apparat til vejrpåvirkning udstyret med et pyrometer (se figur 3). Aluminium er en fremragende varmeleder, og PVC-belægningen er kun 5 µm tyk. Temperaturen måles af et termoelement på bagsiden af den tynde aluminiumsplade hvor den er afskærmet fra strålingen. Med disse to forskellige metoder til temperaturmåling kan der foretages en nyttig validering af pyrometret.

For målingerne taget med pyrometret antages emissionsfaktoren at være 0,93. Figur 4 viser tydeligt temperaturforskellen mellem de forskellige farvede aluminiumsplader. Figur 5 viser temperaturen på de farvede PVC-belagte aluminiumsplader, der er målt ved hjælp af de to teknikker (termoelement og pyrometer) iht. forskellige standardtest. Fra 45 °C til omkring 100 °C ses lignende resultater for alle testmetoder.



Figur 4: Overfladetemperatur på farvede PVC-belagte aluminiumsplader målt med et pyrometer i et apparat til vejrpåvirkning (se figur 3).



Figur 5: Validering af overfladetemperaturer der er målt ved hjælp af forskellige standardtest med et pyrometer (x-aksen) i et eksponeringsapparat, og en strålingsbeskyttet temperaturmåling med et termoelement (y-aksen) bag en tynd aluminiumsplade.

Kalibrering af overfladetemperaturfølere

Overfladetemperaturfølere (se figur 2) skal kalibreres som beskrevet af et anerkendt nationalt standardiseringsråd. I forbindelse med kontaktmåling af temperaturen kalibreres overfladetemperaturføleren ved temperaturligevægt i et væskebad. Der bruges et kontaktermometer som sporbar standard. En kalibreringsmetode hvor der anvendes et pyrometer, er for nylig blevet udviklet. Begge kalibreringsmetoder beskrives i den netop offentliggjorte europæiske standard (prEN 16465: 2014 [7]).

Anvendelser

Følgende eksempler illustrerer overfladetemperaturmålinger på en række forskellige flade materialeprøver, inklusive tekstiler og polymerer. Princippet kan overføres direkte til belægninger. Belægningers reelle overfladetemperaturer er ligeledes offentliggjort i [1].

Tekstilers overfladetemperatur

På figur 6 og 7 [8] ses overfladetemperaturprofiler for en række tekstiler. Temperaturforskellen mellem de forskellige farvede tekstiler i begyndelsen og slutningen af eksponeringen ses på figur 7. Den fjerde og femte af de blå prøver (L2 og L4) har betydeligt lavere temperaturer end de første tre blå prøver (B1, G2 og G4). Årsagen til dette kan være specielle pigmenter eller forskellige aflejringer.

Overfladetemperaturer på polycarbonat-, polypropylen- og PMMA-prøver

Overfladetemperaturer på transparente, semitransparente og opake polycarbonatprøver der indeholder et infrarødt reflekterende pigment (61 x 36 x 4 mm), blev målt i et vejrpåvirkningsapparat med pyrometer, som beskrevet i [7]. Tabel 2 viser en tydelig sammenhæng mellem absorberet stråling og den målte overfladetemperatur. Ved to testbetingelser med konvektionskøling (noteret i kolonne 4 og 5) ligger determinationskoefficienten (Pearson r) tæt på 1. BST-temperaturerne ligger et godt stykke over de nær-sorte opake prøver.

Overfladetemperaturerne på massive polypropylenprøver (70 x 40 x 4 mm) blev målt med specielt indstillede overfladetemperaturfølere i forbindelse med kunstig vejrpåvirkning (se tabel 3). Modstandstermometre (RTD, Pt-1000) blev indlejret i polymeren således at temperaturelementet ikke blev bestrålet direkte. Dette setup blev efterfølgende kalibreret på overfladen, som beskrevet i [7], med et kalibreringspyrometer under realistiske betingelser. Overfladetemperaturen på det sortfarvede polypropylenmateriale var betydeligt højere end BST-temperaturen (tabel 3, kolonne 4). Temperaturen på den naturligt farvede polypropylen (tabel 3, kolonne 3) lå tæt på den hvide standardtemperatur (fx for TBST = 65 °C: TWST = 48 °C).

Transparente materialer (fx PC, PET, PMMA, figur 8) udgør et særligt tilfælde hvor den faktiske overfladetemperatur ofte ligger under den hvide standardtemperatur og tættere på rumtemperaturen [10]. Men den højeste temperatur i transparente prøveemner forekommer under overfladen (ikke på overfladen) når de eksponeres for en strålingskilde [6].

Modeller til forudsigelse af brugslevetiden

I hvilken grad temperaturen afhænger af de fotokemiske reaktioners hastighed kan estimeres ved hjælp af en modificeret Arrhenius-ligning:

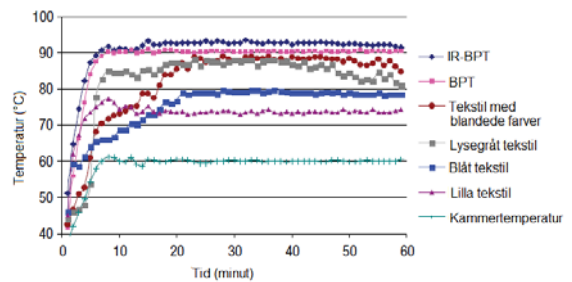
$$k = A \cdot I_{\text{eff}}^{\alpha} \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (\text{Ligning 2})$$

hvor k er reaktionshastigheden, A er Arrhenius-faktoren, R er gaskonstanten (8.314 J·Mol⁻¹·K⁻¹), T er den absolutte temperatur (i K), E_a er aktiveringsenergien (i J·mol⁻¹) af den egenskabsændring der tages i betragtning, I_{eff} er den effektive bestrålingsstyrke, og α er en materialespecifik koefficient.

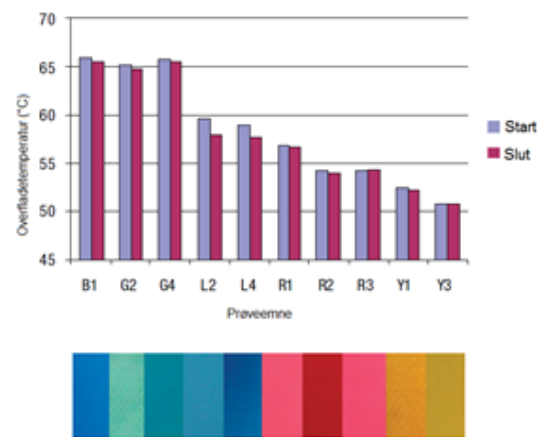
Fraværet af en sporbar kemisk parameter eller reaktion under en vejrpåvirkningstest betyder at man som regel medregner en specifik makroskopisk egenskabsændring (fx glanstab eller farveændring) i Arrhenius-ligningen. Til en estimering af levetiden baseret på accelererede test kan man bruge forholdet mellem reaktionshastighedskonstanterne under accelererede betingelser (a) og brugsbetingelser (u):

$$\frac{k_a}{k_u} = \left(\frac{I_a}{I_u}\right)^{\alpha} \cdot e^{\frac{E_a}{R} \left[\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_a}\right]} = AF_a \cdot AF_u = AF \quad (\text{Ligning 3})$$

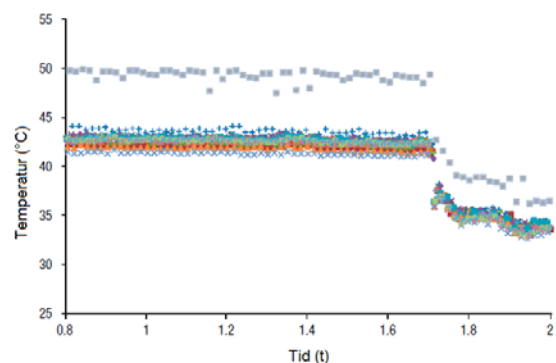
Til estimering af opake prøveemners levetid skal man vælge overfladetemperaturen. Til transparente prøveemner vil den højeste temperatur, som nævnt herover, være lavere end temperaturen på prøveoverfladen [6]. Andre faktorer der påvirker fotonedbrydningen, er den effektive bestrålingsstyrke [11, 12] og iltkoncentrationen, som typisk er på deres højeste ved prøvens overflade, og falder jo større afstanden er fra overfladen [13]. Dette komplicerer estimeringen af brugslevetiden, især for transparente prøveemner.



Figur 6: Overfladetemperaturprofiler for farvede tekstiler målt med et pyrometer ved eksponering i et vejrpåvirkningsapparat efter SAE J2412 (test af materialer til autointeriør) i lysfasen.



Figur 7: Overfladetemperaturmåling [8] på farvede kulorte tekstiler med et pyrometer i et vejrpåvirkningsapparat efter AATCC TM 16E.



Figur 8: Del af cyklus 1 efter ISO 4892-2 metode A (Atlas Ci4000 Weather-Ometer®). Temperaturmåling (med S³T-pyrometer) på polymeriske prøveemner (y-akse): PC, PET, PMMA (60 x 60 x 2 mm) og et hvidt standardtermometer (grå firkanter) som en funktion af testtiden (x-akse). Temperaturfaldet skyldes en påbegyndt sprayfase.

PC-prøve nr.	Beskrivelse	Absorption (%)	T _{SURFACE} (°C)	
			V _{AIR} (høj)	V _{AIR} (lav)
1	Transparent	20	41	48
2	Lys	30	43	52
3	Semitransparent	64	48	60
4	Semitransparent	63	49	55
5	Opak	92	50	65
6	Opak	96	51	65
7	Opak	95	51	66
8	Opak	97	50	64
Pearson r			0,98	0,97

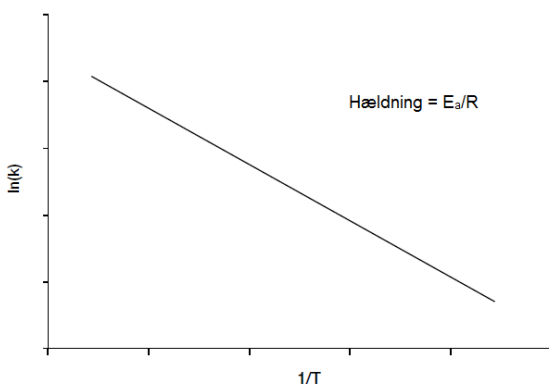
Tabel 2: Overfladetemperaturer på transparente, semitransparente og opake IR-reflekterende PC-prøver ($\epsilon = 0,94$). Estimering af den absorberede stråling ved hjælp af spektral energifordeling (filtreret xenonstråling), spektral transmission (300-800 nm) og refleksion (300-2500 nm). $E_{\text{total}} \approx 1200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, rumtemperatur = 38 °C, $T_{\text{BST}} \sim 68 \text{ °C}$ (< lav luftfartshæd) og 54 °C (> høj luftfartshæd).

T _{BST} (°C)	E _{UV} (W×m ⁻²)	T _{Natur} (°C)	T _{Black} (°C)
65	60	53	69
85	72	73	92
85	48	75	93
65	48	56	75
45	60	39	49
65	60	53	69
45	48	41	52
45	72	34	47
85	60	74	92
65	72	54	68
65	60	53	69

Tabel 3: Faktiske overfladetemperaturer på naturlig og sortfarvet polypropylen under en vejrpåvirkningstest (rumtemperatur = 38 °C) med variabel UV-bestråling og T_{BST}[9]. Overfladetemperaturfølerne blev kalibreret iht. [7] ved hjælp af et pyrometer (ϵ af begge materialer = 0,95).

Bestemmelse af aktiveringsenergier

Bestemmelse af aktiveringsenergien kræver at der udføres eksperimenter ved forskellige temperaturer under ellers identiske betingelser da aktiveringsenergien inden for små temperaturområder er uafhængig af temperaturen. Individuelle vejrpåvirkningstest skal udføres indtil der sker en vis ændring af egenskaberne, eller i en bestemt tidsperiode og ved minimum to forskellige temperaturer (fx ved standard betingelser med BST-temperatur og ved 5 K højere og/eller lavere). Alle andre parametre (bestråling, relativ fugtighed, cyklusparametre) skal holdes konstante, og prøvetemperaturen skal måles. (Note: Under skiftende betingelser skal de såkaldte effektive temperaturer beregnes for at bestemme aktiveringsenergien [11, 12]). Aktiveringsenergien kan beregnes iht. den logaritmiske Arrhenius-ligning (ligning 4) baseret på to vejrpåvirkningstest, eller bestemmes grafisk (ligning 5, figur 9) baseret på to eller flere vejrpåvirkningstest. Når den naturlige logaritme af k afbildes mod det inverse af temperaturen (1/T), er hældningen en lige linje med en værdi svarende til $-E_A/R$.



$$\ln\left(\frac{k_1}{k_2}\right) = \frac{E_A}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \quad (\text{Ligning 4})$$

$$\ln(k) = \ln(A \cdot I^c) - \frac{E_A}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (\text{Ligning 5})$$

Figur 9: Grafisk bestemmelse af aktiveringsenergien iht. ligning 5.

Afhængigt af polymeren og nedbrydningsprocessen ligger aktiveringsenergieerne for fotonedbrydningen af polymere materialer typisk i området fra 10 til 100 kJ·mol⁻¹ [fx, 10, 11, 14]. Antallet af relevante udgivelser er dog begrænset da en nøjagtig bestemmelse af aktiveringsenergieerne for vejrpåvirkning og fotonedbrydning af polymerer og belægninger kan være både tidskrævende og kompliceret. Hvis eksperimentatorerne i forbindelse med vejrpåvirkning er villige til at yde den indsats der skal til for at foretage en komplet bestemmelse af aktiveringsenergieer, vil det være gavnligt at tage de faktiske overfladetemperaturer i betragtning, og ikke bygge dem på et groft skøn baseret på referencetemperaturer. Brugen af pyrometerteknologi, som beskrives i denne artikel, til måling af den faktiske prøveoverfladetemperatur er meget mere effektiv og virkningsfuld end placeringen af temperaturfølere på hvert enkelt individuelle prøveemne.

Effekten af overfladetemperatur og aktiveringsenergi på estimeringen af brugslevetiden

For at vise overfladetemperaturens indvirkning på accelerationen beregnes en tests teoretiske accelerationsfaktorer i overensstemmelse med ISO 4892-2, cyklus 1 for naturlig vejrpåvirkning i Phoenix, Arizona. Et hvidt standardtermometer (WST) er valgt til at repræsentere en lys belægning, og et sort standardtermometer (BST) til at repræsentere en mørk belægning. Til eksponeringsvejene for teoretisk fotonedbrydning vælges aktiveringsenergier på 21, 30, 60 og 100 kJ·mol⁻¹. Ved en lys belægning og lav aktiveringsenergi opnås lave teoretiske accelerationsfaktorer, hvorimod der ved en mørk belægning og en højaktiveringsenergi kan opnås op til 7 gange højere acceleration. Dette viser vigtigheden af overfladetemperatur og aktiveringsenergi for at opnå en pålidelig planlægning og evaluering af vejrpåvirkningstest, og ligeledes hvor stor risikoen for fejlfortolkning kan være når disse faktorer estimeres forkert.

T_{REF}	E_a (kJ·mol ⁻¹)	Phoenix, Arizona		ISO 4892-2, cyklus 1		Teoretisk AF		
		E_{UV} (W·m ⁻²)	T_{eff} (°C)	E_{UV} (W·m ⁻²)	T_{eff} (°C)	AF_R	AF_T	AF
T_{WST}	21	13,8	34,0	60	45,9	4,3	1,4	5,9
	30		34,5		46,1		1,5	6,6
	60		36,1		46,4		2,1	9,2
	100		37,9		46,7		2,9	12,7
T_{BST}	21		43,2		66,6		1,7	7,5
	30		43,9		67,2		2,2	9,5
	60		46,0		58,0		4,3	18,6
	100		48,3		68,8		9,5	41,3

Tabel 4: Iht. ligning 3 estimeres de beregnede accelerationsfaktorer (AF-indekser: AF_R - stråling, AF_T - temperatur) af ISO 4892-2, cyklus 1 med hensyn til den naturlige vejrpåvirkning i Phoenix (T_{REF} , T_{WST} og T_{BST}) på basis af de sorte og hvide pladetemperaturer; E_{UV} beregnes på baggrund af den årlige UV-eksponering i bølgelængdeområdet 295-385 nm); T_{eff} - effektive temperaturer beregnes i overensstemmelse med [11, 12].

Resumé og fremtidsudsigter

Ved naturlige eller kunstige vejrpåvirkningstest afhænger materialeoverfladetemperaturer af absorptionen af den indfaldende stråling. Da direkte temperaturmålinger er svære at tage, bruges referencesensorer til at nærme sig den faktiske materialetemperatur. Faktiske prøveoverfladetemperaturer kan afvige betydeligt fra disse referencetemperaturer. Artiklen diskuterer eksempler hvor der er brugt tekstiler og polymerer.

Bestemmelsen af overfladetemperaturen på prøveemner giver en meget mere nøjagtig estimering af stressparametrene og materialeældningshastigheden – og i sidste ende brugslevetiden. Brugen af pyrometre til bestemmelse af overfladetemperatur er et væsentligt element hvis man vil forenkle undersøgelser af brugslevetiden. Vejrægthedsdata bliver nemmere at forstå med bedre information om disse stressparametre. Hvis man kender materialets temperaturafhængighed (som fx glasovergangstemperaturen) og de tilsvarende nedbrydningsprocesser, kan testparametrene bedre tilpasses de individuelle materials krav, og en højere accelerationshastighed kan opnås på pålidelig vis. Desuden giver kendskabet til overfladetemperaturen mulighed for en bedre sammenligning mellem forskellige testbetingelser eller -cyklusser^[10].

Litteraturliste

- [1] A. Schönlein, O. Haillant, S. Senff, "Surface Temperatures of Color Painted Specimens in Natural and Artificial Weathering with Different Laboratory Light Sources for Optimized Testing and Investigations," 4. europæiske symposium for vejrpåvirkning, Budapest, Ungarn, september 2009.
- [2] W.D. Ketola, R.M. Fischer, "Surface Temperatures of Materials in Exterior Exposures and Artificial Accelerated Tests," accelereret og uendørs holdbarhedstest af organiske materialer, ASTM, STP 1202, 1994.
- [3] W.D. Ketola, R.M. Fischer, K.P. Scott, R. Quinn, "Surface Temperatures of Materials Exposed in a Xenon-Arc Device Controlled with Different Black Panels"; forberedt til ISO/TC61/SC6/WG2, september 2000.
- [4] Norma D. Searle, "Activation Spectra of Polymers and Their Application to Stabilization and Stability Testing," Handbook of Polymer Degradation, 2. oplag, NY 2000.
- [5] K. Scott, J. Zhang, W. Buttner, "Knowing T – Laboratory weathering innovation measures in situ, real time specimen temperatures," European Coatings Journal, 11 (2006) 64-66.
- [6] P. Trubiroha, A. Geburtig, V. Wachtendorf, "Boundary Surface Climates at Irradiated Surfaces," 5. europæiske symposium for vejrpåvirkning, uddannelsesforløb, Lissabon, Portugal, september 2011.
- [7] prEN 16465, Plastik – Metoder til kalibrering af sorte og hvide standardtermometre samt sorte og hvide pladetermometre til brug i forbindelse med naturlig og kunstig vejrpåvirkning, november 2014.
- [8] J. Zhang, W. Buttner, I. Ogadinma, J. Stetter, "Characterization of Lightfastness of Textiles with Infrared Temperature Sensor," international symposium for farveæghed, det 75. DEK årlige møde, oktober 2005.
- [9] T. Reichert u. a., Schlussbericht ViPQuali, "Virtuelle Produktqualifikation für die Nachhaltigkeit – ViPQuali," Support Code 01RI05201-5, endelig projektrapport, BMBF, Bonn, Tyskland, 2012.
- [10] F. Feil, M. C. Grob, A. Schönlein, "Einfluss der Prüfparameter auf die Polymeralterung bei der künstlichen Bewitterung nach ISO 4892-2 Cy 1 und ASTM G 155 Cy1," GUS' 43. årsmøde, marts 2014.
- [11] J.E. Pickett, J.R. Sargent, "Sample temperatures during outdoor and laboratory weathering exposures," Polym. Degrad. Stab., 94, 2009, 189-195.
- [12] O. Haillant, "Realistic test approaches provide accurate LED-lifetime numbers," Elektronikdesign, strategi, nyheder, 18. maj 2011.
- [13] R.L. Feller, "Accelerated Aging – Photochemical and Thermal Aspects," 1994.
- [14] R. M. Fischer, W. D. Ketola, "Error analysis and associated risks for accelerated weathering results" i: J. W. Martin, R. A. Ryntz, R. A. Dickie, redaktører. "Service life prediction: challenging the status quo," 2005, 79-92.