



**YTSKYDDSS
MYNDIGHETEN**

RAPPORT 2026:5

Accelererad åldring av ytskikt

Modellering av UV-, temperatur-
och fuktpåverkan

Accelererad åldring av ytskikt. Modellering av UV-, temperatur- och fuktpåverkan

Rapport 2026:5

Diarienummer: YSM 2026/0838

Utgivare: Ytskyddsmyndigheten, Box 112, 842 21 Sveg

registrator@ytskyddsmyndigheten.se, ytskyddsmyndigheten.se

Rapport 2026:5. Accelererad åldring av ytskikt

Utgiven av Ytskyddsmyndigheten, 2026

Publikationen kan laddas ner från ytskyddsmyndigheten.se. Tryckta exemplar kan beställas från registrator i mån av tillgång.
Citera gärna, men ange källan.

Innehåll

Sammanfattning	4
1 Inledning	5
2 Försöksutrustning och försöksplan	6
2.1 Försöksplan	6
3 Modell	7
3.1 UV-dos	7
3.2 Kinetisk modell för glansförlust	7
3.3 Anpassning på logaritmisk skala	7
4 Resultat	9
4.1 Glansförlust vid tre temperaturer	9
4.2 Hastighetskonstanter per villkor	10
4.3 Skattade parametrar	10
5 Accelerationsfaktor mot utomhusexponering	12
6 Förväntad livslängd och osäkerhet	13
7 Begränsningar	15
8 Slutsatser	16
Referenser	17

Sammanfattning

Rapporten beskriver ett försöksprogram i en UV-accelererad åldringskammare och en kinetisk modell för förlust av glans. Modellen beror av UV-dos, temperatur och relativ luftfuktighet (RF). Försöken omfattar nio kombinationer av 40, 60 och 80 grader och 30, 50 och 95 procent RF. Varje kombination provas vid sex tidpunkter upp till 500 timmar, vilket motsvarar en UV-dos på 116 100 kJ/m².

Aktiveringsenergin skattas till 62,1 kJ/mol, med 95 procent konfidensintervall 61,5 till 62,7 kJ/mol. Vid 60 grader och 50 procent RF ger kammaren 265 timmar utomhusexponering per timme i kammaren, enligt de antaganden som görs i avsnitt 5.

Med de antaganden som görs i avsnitt 5 och 6 blir den förväntade tiden till 80 procent av startglansen utomhus 14,5 år, med 95 procent konfidensintervall 14,0 till 15,0 år. Modellen är en förenkling, och datamängden är syntetisk. Begränsningarna i avsnitt 7 är väsentliga för hur resultaten får användas.

1 Inledning

Accelererad åldring används för att få kunskap om hur ytskikt förändras över tid utan att vänta på verklig exponering. En UV-accelererad åldringskammare utsätter provkroppar för UV-strålning, förhöjd temperatur och kontrollerad luftfuktighet. Ytskyddsmyndigheten anskaffade en sådan kammare under 2026, se YSM 2026/0588.

Rapporten har tre syften. Den beskriver försöksupplägget i kammaren och den kinetiska modell som används för att beskriva glansförlusten. Den visar hur modellens parametrar skattats och hur resultaten kan översättas till utomhusexponering. Slutligen redovisas osäkerheten i en beräknad livslängd och de begränsningar som gäller.

Glans mäts i glansenheter (GU) vid 60 grader enligt metoden i Rapport 2026:3. Den kombinerade standardosäkerheten för ett medelvärde av tio mätningar vid 60 GU är 0,23 GU enligt den rapporten. Samma värde används här som mätfel i försöksdata.

2 Försöksutrustning och försöksplan

Kammaren har de egenskaper som angavs i upphandlingen. Tabell 1 visar de värden som är relevanta för försöken och hur de används. Alla försöksvillkor ligger inom specifikationen, och ingen exponering sker utanför den.

Tabell 1. Kammarens specifikation och användning i försöken

Egenskap	Värde i upphandlingen	Användning i försöken
UVB, 280 till 315 nm	4,5 W/m ² ±10 procent	Ingår i bestrålningsstyrkan
UVA, 315 till 400 nm	60 W/m ² ±5 procent	Ingår i bestrålningsstyrkan
Temperatur	20 till 90 grader, stabilitet ±0,5 grader	40, 60 och 80 grader
Relativ luftfuktighet	30 till 95 procent RF, ±3 procentenheter	30, 50 och 95 procent RF
Provhållare	24 för 150 × 75 mm	Samma provtyp i alla villkor

Källa: kanon, avsnitt 22, YSM 2026/0588.

2.1 Försöksplan

Försöksplanen är en fullständig faktoriell design med tre temperaturer och tre nivåer av RF, alltså nio villkor. Varje villkor exponeras vid sex tidpunkter, 0, 100, 200, 300, 400 och 500 timmar. Vid 500 timmar är den totala UV-dosen 116 100 kJ/m². Provkropparna är ett alkydbaserat ytskikt på provplattor av 150 × 75 mm, med ett startvärde för glans på cirka 90 GU vid 60 grader.

Varje redovisat glansvärde är ett medelvärde av tio mätningar enligt metoden i Rapport 2026:3. Datamängden är syntetisk. Den genererades med en simulering med slumpmässiga mätfel, vars standardavvikelse är 0,23 GU, och den redovisas avrundad till en decimal. Syftet är att visa hur modellen anpassas och vilka osäkerheter som följer av en sådan anpassning. Resultaten är inte mätningar av verkliga ytskikt.

3 Modell

3.1 UV-dos

Den UV-dos som en provkropp får fram till tiden t definieras som integralen av den effektiva bestrålningsstyrkan över tiden, enligt ekvation (1). Bestrålningsstyrkan är summan av bidragen från UVB och UVA, tiden anges i timmar och dosen i kJ/m^2 .

$$H(t) = 3,6 \int_0^t [E_{\text{UVB}}(\tau) + E_{\text{UVA}}(\tau)] d\tau \quad (1)$$

Kammaren ger konstant bestrålningsstyrka under varje försök. Med en summa på $64,5 \text{ W/m}^2$ blir dosen $H(t) = 232,2 \cdot t$, där t är exponeringstiden i timmar. Spektralfördelningen mellan UVB och UVA viktas inte i modellen, se avsnitt 7.

3.2 Kinetisk modell för glansförlust

Glansförlusten beskrivs som en förstaordningsprocess i UV-dos, enligt ekvation (2). Med G som glans vid dosen H , G_0 som startglans och k som hastighetskonstanten. Ekvationen är linjär på logaritmisk skala, vilket gör att parametrarna kan skattas med minsta kvadrat-metoden utan iteration.

$$G(H) = G_0 e^{-kH} \quad \Leftrightarrow \quad \ln G = \ln G_0 - kH \quad (2)$$

Hastighetskonstanten k beror av temperatur och luftfuktighet. Arrhenius-termen beskriver temperaturberoendet och en exponentiell term beskriver fuktens bidrag, enligt ekvation (3). Här är T den absoluta temperaturen i kelvin, RF är relativ luftfuktighet som bråktal och R är gaskonstanten, $8,314 \text{ J/(mol K)}$. Konstanten A är den förexponentiella faktorn och E_a aktiveringsenergin.

$$k(T, RF) = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \exp(b RF) \quad (3)$$

Arrhenius-termen har sitt ursprung i Arrhenius (1889) och används här som en empirisk beskrivning av temperaturberoendet inom försöksintervallet. Den exponentiella formen för RF är en antagen beskrivning av fuktberoendet. Modellen är inte härledd ur en kemisk mekanism i denna rapport.

3.3 Anpassning på logaritmisk skala

Anpassningen sker i två steg. I det första steget skattas G_0 och k för varje villkor genom minsta kvadrat på logaritmisk skala, enligt ekvation (4). I det andra steget skattas parametrarna i ekvation (3) genom att $\ln k$ regresseras mot $1/T$ och RF , enligt ekvation (5). Båda stegen är linjära och löses med vanlig minsta kvadrat-metod.

$$\min_{G_0, k} \sum_j (\ln G_j - \ln G_0 + k H_j)^2 \quad (4)$$

$$\min_{\ln A, E_a, b} \sum_{i=1}^9 \left(\ln k_i - \ln A + \frac{E_a}{RT_i} - b RF_i \right)^2 \quad (5)$$

Standardfel och konfidensintervall beräknas från residualerna i det andra steget och kovariansmatrisen $s^2(X^T X)^{-1}$. Med 9 villkor och tre parametrar har anpassningen 6 frihetsgrader, och konfidensintervallen använder t-fördelningens kvantil 2,4469 för 97,5 procent.

4 Resultat

4.1 Glansförlust vid tre temperaturer

Tabell 2 visar uppmätt glans vid RF 50 procent för de tre temperaturerna. Figur 1 visar samma data tillsammans med den anpassade modellen från det första steget.

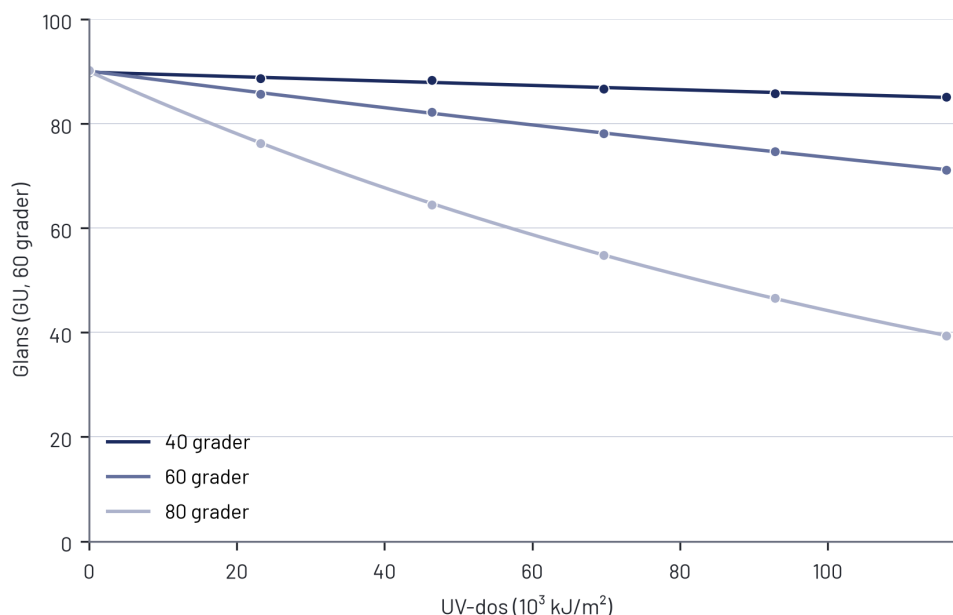
Tabell 2. Glans som funktion av UV-dos vid 50 procent RF

Exponering (timmar)	UV-dos (kJ/m ²)	40 grader (GU)	60 grader (GU)	80 grader (GU)
0	0	89,8	90,1	90,2
100	23 220	88,7	85,7	76,2
200	46 440	88,3	82,2	64,5
300	69 660	86,7	78,1	54,8
400	92 880	85,8	74,7	46,6
500	116 100	85,1	71,1	39,4

Källa: syntetisk datamängd. Medelvärde av tio mätningar per punkt, avrundat till 0,1 GU.

Efter 500 timmar är glansen 85,1 GU vid 40 grader, 71,1 GU vid 60 grader och 39,4 GU vid 80 grader. Det motsvarar 94,7, 79,0 respektive 43,8 procent av den anpassade startglansen. Glansförlusten ökar med temperaturen vid alla exponeringstider efter noll timmar.

Figur 1. Glans som funktion av UV-dos vid 40, 60 och 80 grader och RF 50 procent. Punkterna är uppmätta värden och linjerna är anpassad modell på logaritmisk skala.



Källa: egna beräkningar, syntetisk datamängd.

4.2 Hastighetskonstanter per villkor

Tabell 3 visar hastighetskonstanten k som skattats i det första steget och det värde som modellen i ekvation (3) ger för samma villkor. Den största relativa avvikelsen mellan skattad och modellerad k är 2,0 procent. Det är en följd av mätfelet i försöksdatat, och residualerna i det andra steget redovisas i avsnitt 4.3.

Tabell 3. Hastighetskonstanter och startglans per villkor

Temperatur (grader)	RF (%)	k skattad (10^{-6} per kJ/m^2)	k modell (10^{-6} per kJ/m^2)	G^0 skattad (GU)
40	30	0,38	0,38	90,1
40	50	0,48	0,48	89,8
40	95	0,81	0,82	90,0
60	30	1,55	1,58	90,0
60	50	2,03	2,00	90,1
60	95	3,43	3,41	90,1
80	30	5,62	5,62	90,0
80	50	7,11	7,12	90,0
80	95	12,18	12,15	89,9

Källa: egna beräkningar. Modellvärden från tabell 4.

4.3 Skattade parametrar

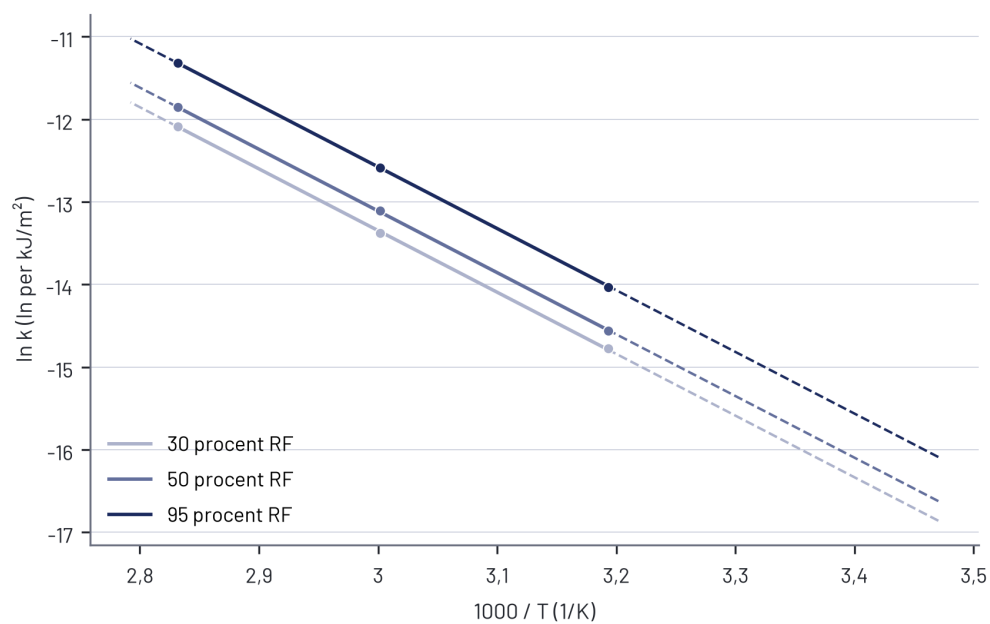
Tabell 4 visar parametrarna i det andra steget. Modellen förklarar 99,99 procent av variationen i $\ln k$ mellan villkoren. Aktiveringsenergin är 62,1 kJ/mol. En höjning av temperaturen med 10 kelvin vid 60 grader ökar k med en faktor 1,92, och en höjning av RF med 10 procentenheter ökar k med en faktor 1,13.

Tabell 4. Skattade parametrar i ekvation (5)

Parameter	Symbol	Skattning	Standardfel	95 procent konfidensintervall
$\ln A$ ($\ln$ per kJ/m^2)	$\ln A$	8,70	0,09	8,49 till 8,91
Aktiveringsenergi (kJ/mol)	E_a	62,1	0,2	61,5 till 62,7
Fuktkoefficient (per enhet RF)	b	1,19	0,02	1,15 till 1,22

Källa: egna beräkningar. Konfidensintervallen använder t-kvantilen 2,4469 för sex frihetsgrader.

Figur 2. Arrheniusdiagram för hastighetskonstanten, per RF-nivå. Heldragna linjer gäller försöksintervallet och streckade linjer är extrapolering till utomhusvillkor.



Källa: egna beräkningar, syntetisk datamängd.

5 Accelerationsfaktor mot utomhusexponering

Accelerationsfaktorn AF definieras som antalet timmar utomhus som ger samma glansförlust som en timme i kammaren. Med de E-värden som används, 64,5 W/m² i kammaren och 6,0 W/m² utomhus, ges AF av ekvation (6). Hastighetskonstanterna är modellvärden för respektive villkor. Eftersom faktorn 3,6 kJ/(W h) förekommer i båda doserna, tar den sig ur kvoten.

$$AF = \frac{k_{lab} E_{lab}}{k_{ute} E_{ute}} \quad (6)$$

Utomhusvillkoren är antaganden och inte mätningar. Tabell 5 bygger på följande antaganden:

- Medelbestrålningsstyrkan utomhus, över ett helt år och inklusive natt, är 6,0 W/m² i intervallet 280 till 400 nm.
- Provkroppens medeltemperatur är 15 grader och medelvärdet för relativ luftfuktighet är 75 procent.
- Samma kemiska process gäller i hela temperatur- och fuktintervallet, så att Arrhenius-termen kan användas utanför försöksintervallet 40 till 80 grader.
- Glansförlusten är linjär i dos enligt ekvation (2), också vid lägre doshastighet.
- UVB och UVA ingår i dosen utan spektral korrektion. Den årliga utomhusdosen är 189 216 kJ/m².

Tabell 5. Accelerationsfaktor mot basvillkoren utomhus, per försöksvillkor

Temperatur (grader)	RF (%)	k modell (10 ⁻⁶ per kJ/m ²)	AF (timmar utomhus per timme)	År utomhus per 1 000 timmar i kammaren
40	30	0,38	50	5,7
40	50	0,48	63	7,2
40	95	0,82	108	12,3
60	30	1,58	209	23,8
60	50	2,00	265	30,2
60	95	3,41	452	51,5
80	30	5,62	743	84,8
80	50	7,12	942	107,5
80	95	12,15	1 607	183,4

Källa: egna beräkningar under antagandena ovan.

Vid 60 grader och 50 procent RF motsvarar en timme i kammaren 265 timmar utomhus under antagandena. Värdet ska läsas som en storleksordning och inte som ett exakt tal, eftersom temperaturdelen av kvoten är en extrapolering.

6 Förväntad livslängd och osäkerhet

Livslängden definieras här som tiden tills glansen sjunkit till 80 procent av startvärdet. Gränsen är ett modellantagande och inte ett krav i föreskrifterna. Med linjär dos ger ekvation (7) tiden till gränsen.

$$t_s = \frac{-\ln R_{\text{crit}}}{k_{\text{ute}} H_{\text{år}}} \quad (7)$$

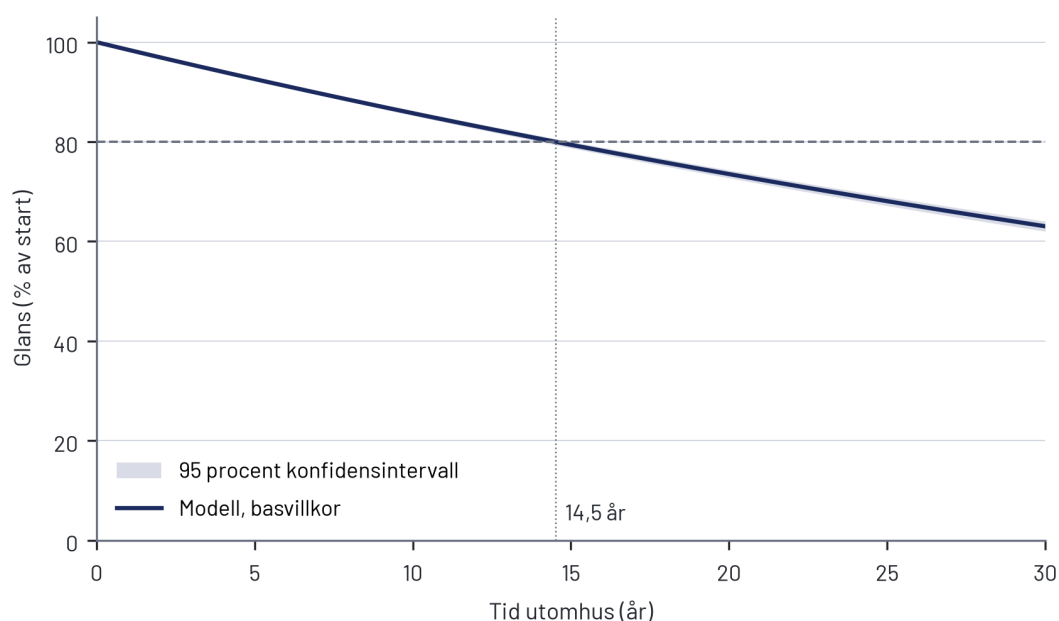
Osäkerheten i $\ln k$ för utomhusvillkoren beräknas från kovariansmatrisen i avsnitt 4.3 enligt ekvation (8). Eftersom tiden är omvänt proportionell mot k är osäkerheten i $\ln t$ lika stor som i $\ln k$. Konfidensintervallet för modellens förväntade värde ges av ekvation (9).

$$\sigma_{\ln k} = \sqrt{\mathbf{x}^T \mathbf{S} \mathbf{x}}, \quad \mathbf{x} = \left(1, \frac{1}{T_{\text{ute}}}, RF_{\text{ute}}\right) \quad (8)$$

$$t_s e^{\pm t_{0,975} \sigma_{\ln k}} \quad (9)$$

Med basvillkoren blir tiden till 80 procent av glansen 14,5 år, med konfidensintervall 14,0 till 15,0 år. Det statistiska intervallet är smalt jämfört med osäkerheten i modellens form, eftersom utomhusvillkoren ligger utanför försöksintervallet för temperatur. Figur 3 visar förloppet utomhus med osäkerhetsbandet.

Figur 3. Förväntad glans utomhus under basvillkoren, med 95 procent konfidensintervall. Den streckade linjen markerar 80 procent av startglansen.



Källa: egna beräkningar under antagandena i avsnitt 5.

Tabell 6 visar hur livslängden förändras med medeltemperatur och luftfuktighet. Ett varmare klimat ger kortare livslängd. Temperaturberoendet är en extrapolation från försöksintervallet, och osäkerheten i det är större än vad de statistiska intervallen visar.

Tabell 6. Förväntad tid till 80 procent glans under olika utomhusvillkor

Scenario	Medeltemperatur (grader)	Medel-RF (%)	Tid (år)	95 procent konfidensintervall (år)
Basvillkor	15	75	14,5	14,0 till 15,0
Kallare klimat	10	75	22,9	22,1 till 23,8
Varmare klimat	20	75	9,3	9,0 till 9,6
Torrare klimat	15	60	17,3	16,8 till 17,9

Källa: egna beräkningar under antagandena i avsnitt 5.

7 Begränsningar

- Datamängden är syntetisk. Resultaten visar hur metoden fungerar, men de är inte skattningar av verkliga ytskikt.
- Modellen har tre parametrar och bygger på en enkel dosberoende kinetik. Verkliga ytskikt kan ha en snabbare initial förlust, en efterföljande plattare kurva och ett beroende av filmtjocklek.
- UVB och UVA viktas inte olika. Kammarens spektrum avviker från solens spektrum, och den skillnaden är inte korrigerad i modellen.
- Temperaturberoendet skattas från tre temperaturer och extrapoleras till utomhusvillkor. Konfidensintervallen tar inte hänsyn till fel i modellens form.
- Kammarens toleranser för temperatur och RF ingår inte i anpassningen. Modellen tar inte hänsyn till kondens, vattenfilm eller temperaturcykler, som kan ge en annan nedbrytning än kontinuerlig exponering.
- Samma startvärde antas för alla provkroppar, bortsett från mätfel. Variation mellan provkroppar ingår inte i osäkerheten.

8 Slutsatser

- Modellen beskriver glansförlusten över försöksintervallet, med R^2 0,9999 för $\ln k$ på andra steget.
- Aktiveringsenergin är 62,1 kJ/mol. Luftfuktighetens koefficient ger en faktor 1,13 per 10 procentenheter RF.
- Basvillkoren ger en tid till 80 procent glans på 14,5 år, med konfidensintervall 14,0 till 15,0 år.
- Resultaten bör användas för att jämföra villkor i kammaren, och inte som ett direkt livslängdsbesked för ett ytskikt.

Referenser

Arrhenius, S. (1889). Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren. Zeitschrift für physikalische Chemie, 4.

Ekström, H. (2019). Fotooxidation och glansförlust i alkyda ytskikt. Ytteknisk rapport, nr 9.

Lindqvist, G. (2016). Mätosäkerhet i ytmätning. Ytteknisk rapport, nr 14.

Ytskyddsmyndigheten (2026). Rapport 2026:3, Mätosäkerhet vid glansmätning. YSM 2026/0836.