

ABSCHLUSSBERICHT

1 Allgemeine Angaben

DFG-Geschäftszeichen: STR 482/6-1

Projektnummer: 427405088

Titel des Projekts: Charakterisierung des nichtlinearen viskoelastischen Materialverhaltens von ETFE- und ECTFE-Folien zum Einsatz in Membranstrukturen des Bauwesens

Name(n) des/r Antragstellenden: Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

Dienstanschrift/en: Universität Duisburg-Essen, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften, Institut für Metall- und Leichtbau, Universitätsstr. 15, 45141 Essen

Name(n) der Mitverantwortlichen: Dr.-Ing. Jörg Uhlemann, Felix Surholt, M.Sc.

Name(n) der Kooperationspartnerinnen und -partner: –

Berichtszeitraum (gesamte Förderdauer): 01.12.2019 – 30.11.2023

2 Zusammenfassung / Summary

Zusammenfassung

Derzeit werden die ausschließlich auf Zug abtragenden ETFE-Folien als leichte und weitspannende Dach- und Fassadenelemente in Membranstrukturen des Bauwesens unter heterogenen Regelungen eingesetzt. Um vereinheitlichte Regelungen aufstellen zu können, galt es als zentrales Forschungsziel, die grundlegenden Wissenslücken in Bezug auf das Materialverhalten von ETFE-Folien zu schließen, indem das Kurz- und das Langzeitzugverhalten analysiert wurde. Das zeit- und temperaturabhängige Materialverhalten des Folienwerkstoffs ETFE wurde sowohl unter mono- als auch biaxialer Beanspruchung charakterisiert.

Das biaxiale Materialverhalten unter Kurz- und Langzeitzugeinwirkungen ist entscheidend für die Bemessung und Optimierung von ETFE-Strukturen, aber ungleich aufwendiger zu messen. Daher wurde eine analytische Korrelation zwischen dem mono- und biaxialen Materialverhalten unter Kurz- und Langzeitzugeinwirkungen entwickelt, sodass das biaxiale Materialverhalten auf Basis monoaxialer Zugversuche bestimmt werden kann. Neben den Materialuntersuchungen zum zeit- und temperaturabhängigen Materialverhalten von ETFE-Folien wurden unterschiedliche Foliendicken (100 μm , 250 μm) und drei unterschiedliche Materialprodukte betrachtet. Die Unterschiede waren so deutlich, dass verschiedene Materialklassen definiert wurden.

Summary

ETFE-foils, which are applied exclusively in tension-bearing structures, are used as lightweight and wide-span roof and façade elements in membrane structures in the building industry under heterogeneous regulations. In order to be able to define standardised regulations, the central research objective was to close the fundamental knowledge gaps with regard to the material

behaviour of ETFE-foils by analysing the short- as well as the long-term tensile behaviour. The time- and temperature-dependent material properties of the ETFE-foil material under uni- and biaxial stresses were characterised.

The knowledge about the biaxial material behaviour under short- and long-term tensile effects is decisive for the design and optimisation of these structures, but is much more difficult to examine. Therefore, an analytical correlation between the uni- and biaxial material behaviour under short- and long-term tensile actions was developed in order to characterise the biaxial material behaviour on the basis of uniaxial tensile tests. In addition to the material tests on the time- and temperature-dependent material behaviour, ETFE-foils of different foil thicknesses (100 μm , 250 μm) and foils from three different material producers were examined. The differences were so clear that different material classes were defined.

3 Wissenschaftlicher Arbeits- und Ergebnisbericht

3.1 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Membranbaustoffe gelten als nicht geregelte Bauprodukte. Hierzu zählen ETFE- und ECTFE-Folien. Ziel des Projektes war daher die Materialcharakterisierung der im Membranbauwesen eingesetzten Folienwerkstoffe in Bezug auf das Materialverhalten unter Kurz- und Langzeit-zugeinwirkungen (Kriechen, Relaxation). Zur Charakterisierung der Folienwerkstoffe galt es, mono- sowie biaxiale Versuche durchzuführen, die die Auswirkungen durch die materialbeeinflussenden Kennwerte aus Temperatur, Dehngeschwindigkeit, Belastungs(vor-)geschichten und Spannungsverhältnissen in Kurzzeitzugversuchen auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten aufzeigen. Des Weiteren sollten mono- sowie biaxiale Versuche es ermöglichen, die Einflüsse aus Temperatur, Lastniveau, Belastungsdauer und Spannungsverhältnissen in Langzeitzugversuchen zur Ermittlung des Kriech- und Relaxationsverhaltens zu analysieren. Zusätzlich galt es die Auswirkungen unterschiedlicher Materialdicken und das Materialverhalten verschiedener marktüblicher Folienprodukte zu untersuchen und zu charakterisieren.

Hierbei war das biaxiale Materialverhalten maßgebend, da Membranstrukturen biaxial gespannt sind und der Lastabtrag biaxial erfolgt. Um den Mehraufwand biaxialer Materialprüfungen zukünftig zu reduzieren, galt es eine analytische Korrelation zwischen dem mono- und biaxialen Materialverhalten zu entwickeln.

3.2 Beschreibung der projektspezifischen Ergebnisse und Erkenntnisse

3.2.1 Abweichungen vom ursprünglichen Konzept

Nach der Projektbewilligung und während der Vorbereitung stellte sich heraus, dass das im Forschungsantrag genannte ECTFE-Material in dem notwendigen Maße (Folienmenge, Rollenbreite) sowohl vom japanischen Hersteller DENKA als auch vom italienischen Hersteller Solvay Specialty Polymers s.p.a. nicht erhältlich war. Zudem zeigten Voruntersuchungen eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit, sodass das ECTFE-Material nicht in der Ausführung von Membrantragwerken im Bauwesen wirtschaftlich eingesetzt werden kann. Daraufhin

wurden die Untersuchungen am ECTFE-Folienmaterial im Vorhaben nicht weiterverfolgt und stattdessen die Untersuchungen am ETFE-Folienmaterial von primär zwei auf drei zu untersuchende Hersteller angehoben. Die materialcharakterisierenden Prüfungen wurden schließlich an 100 μm und 250 μm ETFE-Folien der Hersteller Nowofol Kunststoffprodukte GmbH & Co. KG (ET 6235 Z), AGC Chemicals Europe Ltd. (Fluon® ET Film) und Textiles Coated International (TCI) (TCI Reveal™ ETFE) durchgeführt, im Weiteren anonymisiert Hersteller I, II und III genannt. Weitere Abweichungen zum ursprünglichen Konzept werden bei der Ergebnisbeschreibung erörtert.

3.2.2 Beschreibung der durchgeführten Arbeiten

Monoaxiales Kurzzeitzugverhalten

Als Basis für die Charakterisierung des ETFE-Folienmaterials wurden umfangreiche Untersuchungen zum monoaxialen Zugtragverhalten durchgeführt. Hierbei wurden die Einflussparameter aus jeweils fünf Temperaturen und Dehngeschwindigkeiten sowie aus verschiedenen zyklischen Belastungen analysiert. Je Parameterkombination wurden fünf anstelle von drei Einzelversuchen je Materialdicke und Hersteller in Extrusionsrichtung des Folienmaterials (ED) durchgeführt. Das monoaxiale Zugtragverhalten in Quer- bzw. Transversalrichtung (TD) wurde bei Raumtemperatur (RT) und drei Dehngeschwindigkeiten identifiziert. Hierbei wurde ein nahezu isotropes Materialverhalten bis zur Streckgrenze f_y beobachtet. Anhand der durchgeführten monoaxialen Zugversuche wurde das temperatur- und dehngeschwindigkeitsabhängige Materialverhalten erfasst, welches in [21] veröffentlicht wurde. Weitere Untersuchungen zum Materialverhalten bei -23 °C wurden ergänzt. Die Temperatur besitzt einen deutlich ausgeprägteren Einfluss auf das Materialverhalten als die Variation der Dehngeschwindigkeit. Mit fallender Temperatur und/oder steigender Dehngeschwindigkeit steigen die Festigkeiten und Steifigkeiten der ETFE-Folien, siehe Bild 1 und auch beispielsweise [1]-[6]. Ferner zeigt sich ein produktabhängiges Materialverhalten. Beispielsweise zeigt das Material des Herstellers II signifikant geringere Festigkeiten bei identischen Prüfbedingungen. Dies begründet die Notwendigkeit von Festigkeitsklassen für eine wirtschaftliche Bemessung. Folglich wurden drei Materialklassen 1 (Hersteller I), 2 (Hersteller III) und 3 (Hersteller II) gebildet.

Zur Beschreibung der materialtypischen Festigkeitskennwerte des ersten (f_{ip}) und zweiten (f_y) Knickpunkts in der Spannung-Dehnungs-Kurve, siehe exemplarisch Bild 1, wurden analytische Gleichungen hergeleitet, mit derer in Abhängigkeit der Temperatur T [K], der Dehngeschwindigkeit (Traversengeschwindigkeit v [mm/min]) sowie der Materialklasse diese Festigkeitskennwerte berechnet werden können und die im Anschluss in die Entwicklung eines modifizierten Ramberg-Osgood-Materialmodells eingeflossen sind, siehe [21]. Ergänzend zu [21] wurden Teilsicherheitsbeiwerte für das analytische Modell zur Ermittlung der materialtypisierenden Festigkeitskennwerte f_{ip} und f_y nach DIN EN 1990 [7] statistisch ausgewertet und die Parameter zur Bestimmung der Festigkeitskennwerte klassenspezifisch definiert. Das

modifizierte, zweiteilige Ramberg-Osgood-Materialmodell ist in [21] gegeben und enthält die Modellparameter K [-], n [-], $\Delta\varepsilon_y$ [-] und m [-], die Steifigkeiten E [N/mm²] und E_{ve} [N/mm²] sowie die Festigkeitskennwerte f_{ve} und f_y . Der Kennwert f_{ve} kennzeichnet den Übergang zum zweiten linearen Materialverhalten nach Erreichen des viskoelastischen Limits. Fortsetzend zu den Angaben in [21] wurde die Anwendung vereinfacht, indem generalisierte, temperatur- und dehngeschwindigkeitsunabhängige Parameter für das modifizierte Ramberg-Osgood-Materialmodell bestimmt wurden. Mittels der klassenspezifischen Parameter sowie temperaturabhängigen E-Moduln konnte das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der verschiedenen ETFE-Folien modelliert werden. Bild 1 stellt eine Mischung aus experimentellen und modellierten (Mo.) Spannungs-Dehnungs-Kurven unterschiedlicher Foliendicken, Temperaturen und Geschwindigkeiten dar. Das detaillierte Vorgehen zur Modellierung des monoaxialen, temperatur- und dehngeschwindigkeitsabhängigen Materialverhaltens wurde in [21] veröffentlicht, wobei in [21] noch keine Definition der Materialklassen vorgenommen wurde.

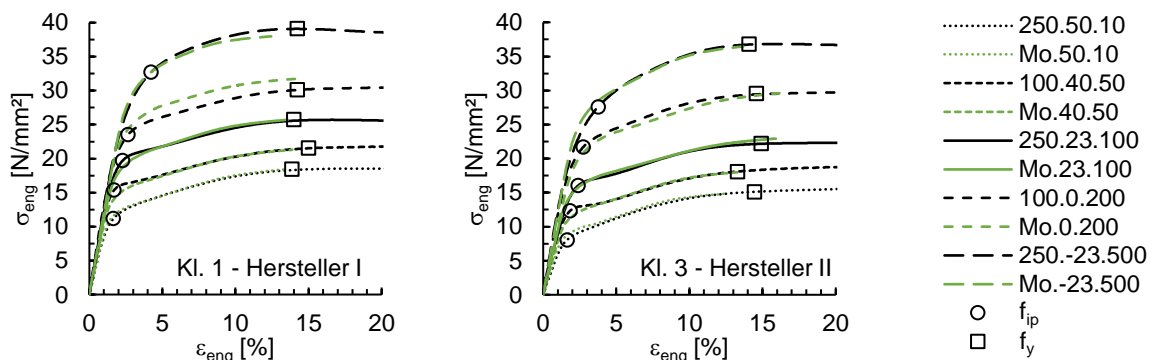


Bild 1 Darstellung des gemessenen und modellierten (Mo.) monoaxialen Spannungs-Dehnungsverhaltens der Materialklassen 1 und 3 (Bez.: „Dicke[μm].Temperatur[°C].Prüfgeschwindigkeit[mm/min]“)

Die Versuche unter zyklischer Belastung wurden anhand zweier Verfahren durchgeführt. Zum einen wurden zyklische Belastungen mit Oberspannungen von $0,65 f_y$ und $0,95 f_y$ und konstanten Unterspannungen von $0,5 \text{ N/mm}^2$ durchgeführt. Zum anderen wurden ergänzende zyklische Untersuchungen mit Oberspannungen von $0,80 f_y$ bei Unterspannung von $0,5 \text{ N/mm}^2$ ergänzt sowie zusätzliche Untersuchungen mit zyklischen Belastungen nach Anhang E der prCEN/TS 19102 [8] durchgeführt. Für die zyklischen Versuche mit streckgrenzen- (f_y -)abhängigen Oberspannungen wurden die Streckgrenzen anhand monoaxialer Kurzzeitzugprüfungen ermittelt. In den Versuchen basierend auf f_y zeigte sich ein Verfestigungsverhalten bezüglich der Streckgrenze in Abhängigkeit des Belastungsniveaus. Zyklische Belastungen bei RT und $0,95 f_y$ resultieren in einer Erhöhung der Streckgrenze um bis zu 10 % bei einer anschließenden Belastung mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit bis zum Bruch. Ferner zeichnen sich deutliche Dehnungszunahmen je Lastzyklus ab.

Biaxiales Kurzzeitzugverhalten

Da Membranstrukturen des Bauwesens biaxial gespannt sind, ist die Kenntnis biaxialer Materialcharakteristika für deren Auslegung zwingend erforderlich. Um den Mehraufwand biaxialer Prüfungen zu minimieren, wurde eine analytische Korrelation zwischen dem mono- und

biaxialen Kurzzeitzugtragverhalten entwickelt. Untersuchungen bezüglich einer Probekörperoptimierung und -versteifung wurden experimentell und numerisch durchgeführt. Leider führten die entwickelten Versteifungsmaßnahmen zur Optimierung der für biaxiale Zugprüfungen üblicherweise verwendeten Kreuzprobekörper nicht zum gewünschten Materialversagen im biaxial belasteten Messfeld. Als Ergebnis dieser Untersuchungen ist daher zunächst festzuhalten, dass eine Optimierung der Kreuzprobekörper nicht zielführend realisierbar ist, weswegen nach wie vor mit diesem Probekörpertyp kein zweiter Knickpunkt im Spannungs-Dehnungs-Verhalten identifizierbar ist.

In den biaxialen Kurzzeitzugversuchen zeigten sich erneut drei Materialklassen. Analog zu den monoaxialen Kurzzeit-Zugprüfungen zeigte sich ein nahezu isotropes Materialverhalten. Das biaxiale Materialverhalten wurde in den biaxialen Spannungszuständen 1:1 und 1:0,5 sowie in den im erweiterten Umfang untersuchten Spannungsverhältnissen 1:0,33, 1:0,25, 1:0,2 und 1:0 erfasst. Anhand der biaxialen Kurzzeitzugversuche wurde eine analytische Korrelation zwischen dem mono- und biaxialen Materialverhalten entwickelt. Erste Ansätze des Entwicklungsprozesses der analytischen Korrelation sind in [22] veröffentlicht. Basierend auf der Annahme eines ebenen Spannungszustandes, wurden die in [21] beschriebenen Funktionen um den Einfluss der Querkontraktion ν erweitert, siehe Gl. (1). Für eine genauere Abschätzung des biaxialen Materialverhaltens und zur Berücksichtigung des Spannungsverhältnisses wurden zusätzlich R-Faktoren je nach Spannungsverhältnis implementiert mit $R_I = 1$ und $R_{II} = \{1;0,5;0,33;0,25;0,2;0\}$. Durch die Festigkeitszunahme in den Spannungsverhältnissen (S_{ve}) 1:1 bis 1:0,2 musste das analytische Modell zur Ermittlung des Festigkeitskennwerts, siehe [21], modifiziert werden, siehe Gl. (2).

$$\varepsilon_{\text{biax,I}}(\sigma) = \varepsilon_{\text{mono}}(\sigma) \cdot (R_I - \nu R_{II}) = \left(\frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{f_{ve}} \right)^n \right) \cdot (R_I - \nu R_{II}) \quad \sigma \leq f_{ve}(T, \nu, Kl., S_{ve}) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\text{biax,II}}(\sigma) = \varepsilon_{\text{mono}}(\sigma) \cdot (R_I - \nu R_{II}) = \left(\frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{f_{ve}} \right)^n \right) \cdot (-\nu R_I + R_{II})$$

$$f_{ve}(T, \nu, Kl., S.) = \left(\exp \left(a + \frac{b}{c + \nu} \right) \right) \cdot (d(T - 296,15) + f) \cdot S_{ve} \quad \begin{array}{l} S_{ve}(1:1;1:0) = 1,0 \\ S_{ve}(1:0,5) = 1,15 \\ S_{ve}(1:0,33-0,2) = 1,10 \end{array} \quad (2)$$

Unter Verwendung der in Gl. (1) und Gl. (2) erarbeiteten Funktionen kann das biaxiale Materialverhalten bis zur oberen Modellierungsgrenze $f_{ve, \text{biax}}$, jedoch nicht darüber hinaus modelliert werden, siehe Bild 2, da die Streckgrenze $f_{y, \text{biax}}$ mittels der verwendeten Kreuzprobekörper nicht identifiziert werden konnte.

Berstdruck-/Multiaxversuche stellen hier eine sinnvolle Alternative dar, die in dem DFG-Vorhaben 527832586 behandelt werden. Um erste Erkenntnisse zum biaxialen Materialverhalten zu erhalten, wurde – zusätzlich zum bewilligten Untersuchungsumfang – ein kreisrunder Berstversuchsstand eingerichtet, um den im Scheitel auftretenden multiaxialen Spannungszustand erfassen zu können. Die Vorarbeiten zum Berstversuchsstand wurden in [25] präsentiert.

Leichte Anisotropien konnten in biaxialen, zyklischen Versuchen identifiziert werden. Diese Anisotropie im Materialverhalten wird erst durch eine zyklische Belastung sichtbar, wobei die materialherstellerabhängigen Dehnungen in TD stets höher sind als die Dehnungen in ED.

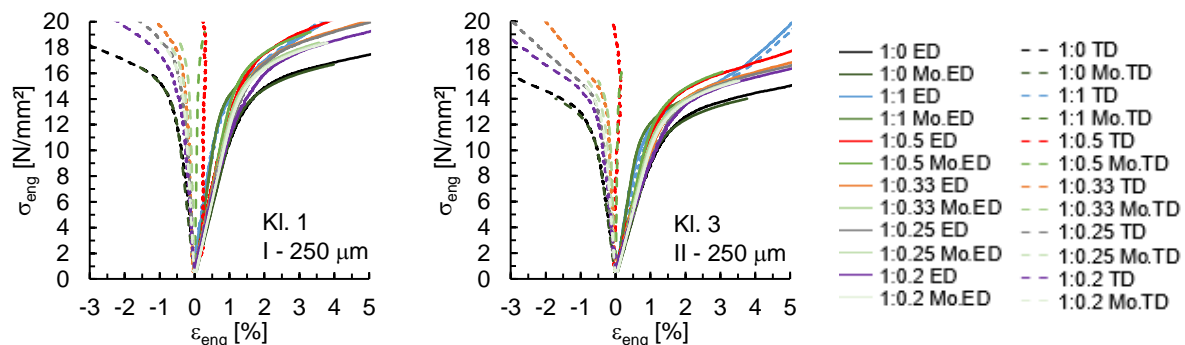


Bild 2 Darstellung des gemessenen und modellierten (Mo.) biaxialen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von ETFE-Folien der Materialklassen 1 und 3 bei 23 °C, 1,5 N/mm²/min; aufgetragen gegen die Spannungen in Führungsrichtung

Monoaxiales Langzeitzugverhalten

Zur weiteren Materialcharakterisierung wurden monoaxiale Langzeitzugversuche in Form von Kriech- und Relaxationsversuchen auf unterschiedlichen Lastniveaus bei verschiedenen Temperaturen über variierende Belastungszeiträume durchgeführt. Die Belastungsniveaus wurden auf 12 N/mm², 8 N/mm² und 4 N/mm² festgelegt, letzteres, um ein für Folienstrukturen übliches Vorspannniveau mit abdecken zu können. Das Materialverhalten wurde anschließend mittels rheologischer Modelle erfasst, wobei das Vorgehen [11]-[14] ähnelt. Im Kriechverhalten stellten sich erneut drei Materialklassen ein, da sich deutliche Dehnungsunterschiede bei identischen Belastungen über identische Zeiträume feststellen ließen. Ferner zeigt sich ein überproportionaler Zusammenhang zwischen den Kriechdehnungen und der Kriechbelastung. Kriechversuche bei 0 °C wurden für das Belastungsniveau 12 N/mm² für 250 µm dicken Folien durchgeführt, wobei über einen Zeitraum von 18 h eine Kriechdehnung von lediglich 0,78 % beim Material der Klasse 3 gemessen wurden, sodass Kriechversuche bei niedrigeren Temperaturen und geringeren Belastungen als 12 N/mm² nicht mehr durchgeführt wurden. Zur Modellierung des monoaxialen Kriechverhaltens wurde die Schapery Integral Form [15] verwendet, welche durch rheologische Modelle beschrieben und durch eine Prony-Reihe abgebildet wurde. Diese wurden in [26] präsentiert. Zur Bestimmung der in Reihe geschalteten Kelvin/Voigt-Modelle wurden die spannungs- und zeitabhängigen Kriechdehnungen $\Delta\varepsilon_c$ aus den Gesamtdehnungen $\varepsilon_{eng,c}$ extrahiert und anhand des Temperatur-Zeit-Verschiebungsprinzips nach Williams, Landel und Ferry [16] und Spannungs-Zeit-Superpositionsprinzips nach [17] kombiniert und mit Hilfe eines auf die Zeitelemente τ_i bezogenem Faktors $\log(\alpha_{T\sigma})$ verschoben. Hiermit wurde je Materialklasse eine Nachgiebigkeits-Masterkurve erstellt. Die Referenztemperatur wurde zu 296,15 K und die Referenzspannung zu 4 N/mm² gewählt. Bild 3 stellt eine Mischung des berechneten und gemessenen Kriechverhaltens der untersuchten ETFE-Folien dar.

In den Relaxationsversuchen wurden identische Belastungsniveaus zu den Kriechversuchen angestrebt. In Bild 4 ist das Relaxationsverhalten der untersuchten ETFE-Folien beispielhaft bei RT über eine Relaxationszeit von 1.000 h dargestellt. Hierbei zeigte sich, dass sich abhängig vom angesetzten Lastniveau, der angesetzten Temperatur und von der Materialklasse unterschiedlich konvergierende Relaxationsniveaus einstellen, die zum Teil den Angaben der in [18] und [19] enthaltenen Werte widersprechen, sodass für die untersuchten Folien abweichend zu [18] nicht einheitlich eine untere Relaxationsgrenze von 7,0 N/mm² für eine initiale Dehnung > 1 % und abweichend zu prCEN/TS 19102 auch nicht einheitlich eine maximale initiale Vorspannkraft von 7,5 N/mm² angesetzt werden kann. Die durchgeführten Relaxationsversuche bei RT weisen auf ein Relaxationsniveau von 4,2 N/mm² hin, welches mit den auftretenden, marginalen Kriechdehnungen unter einer Belastung von 4,0 N/mm² übereinstimmt. Der Relaxationsprozess ist hierbei auch von der Materialklasse abhängig.

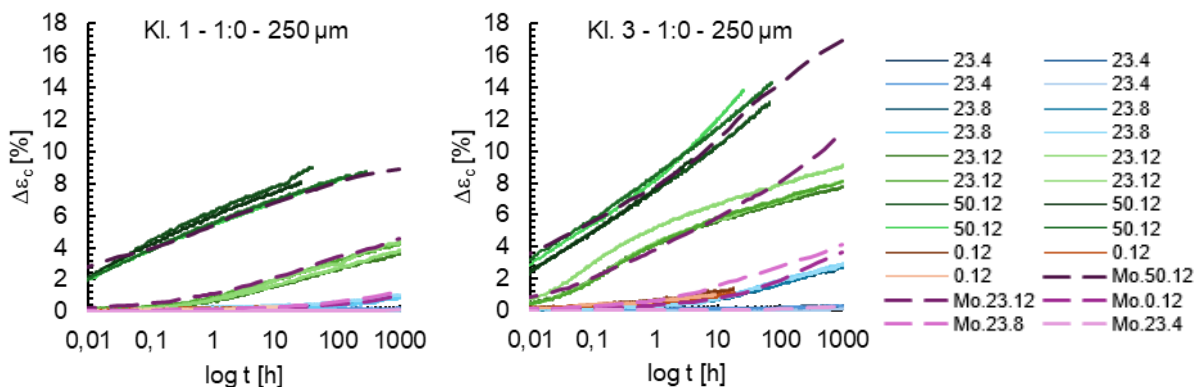


Bild 3 Darstellung des gemessenen und modellierten (Mo.) monoaxialen temperatur- und spannungsabhängigen Kriechverhaltens der Materialklassen 1 und 3 in ED (Bez.: „Temperatur[°C].Spannung[N/mm²]“)

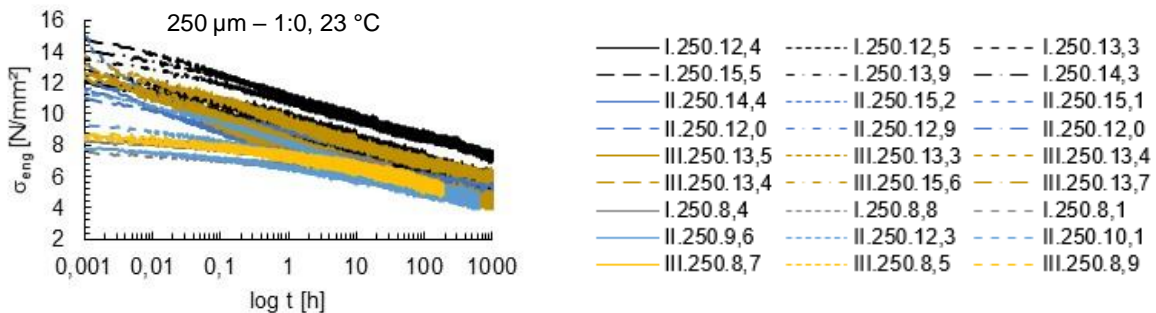


Bild 4 Monoaxiales Relaxationsverhalten von 250 µm ETFE-Folien dreier Hersteller unter konstanter Dehnung bei T[°C] = {23; 50} (Bez.: „Hersteller.Folien Dicke[µm].Spannung[N/mm²]“)

Biaxiales Langzeitzugverhalten

Das biaxiale Langzeitzugverhalten wurde ebenfalls mittels biaxialer Kriech- und Relaxationsversuche analysiert. In Abhängigkeit des Materials zeigte sich, dass das biaxiale Kriechverhalten in einem 1:1 Spannungsverhältnis um ca. 60 % bis 70 % geringer ausfällt als das monoaxiale Kriechverhalten, was mit den Angaben von Li/Wu [20] übereinstimmt. Um den Ansatz analog zum Kurzzeitzugverhalten zu verfolgen, wurden die entwickelten, materialklassenspezifischen Nachgiebigkeitsmasterkurven je Materialklasse mit dem Einflussfaktor der Querdehnzahl ν erweitert. Zusätzlich wurden materialklassenspezifische R_c -Faktoren implementiert, um das biaxiale Kriechverhalten trotz der erhöhten Reduktion über den Einfluss der Querdehnzahl

hinaus modellieren zu können. Gl. (3) stellt das Vorgehen zur analytischen Berechnung des biaxialen Kriechverhaltens auf Basis monoaxialer Kenndaten für die beiden Hauptrichtungen dar. Die Temperatur- und Spannungseinflüsse sind bereits durch die entwickelte Temperatur-Spannungs-Zeit-Verschiebung berücksichtigt.

$$\Delta \varepsilon_{c,biax,I}(\sigma_c, t) = \Delta \varepsilon_{c,mono}(\sigma_c, t) [R_{I,c} - \nu R_{II,c}] \quad \Delta \varepsilon_{c,biax,II}(\sigma_c, t) = \Delta \varepsilon_{c,mono}(\sigma_c, t) [-\nu R_{I,c} + R_{II,c}] \quad (3)$$

Bild 5 stellt beispielhaft den Vergleich zwischen dem gemessenen und berechneten Kriechverhalten in Form der Kriechdehnungen $\Delta \varepsilon_c$ [%] dar. Entwicklungsschritte der analytischen Korrelation wurden in [26] präsentiert.

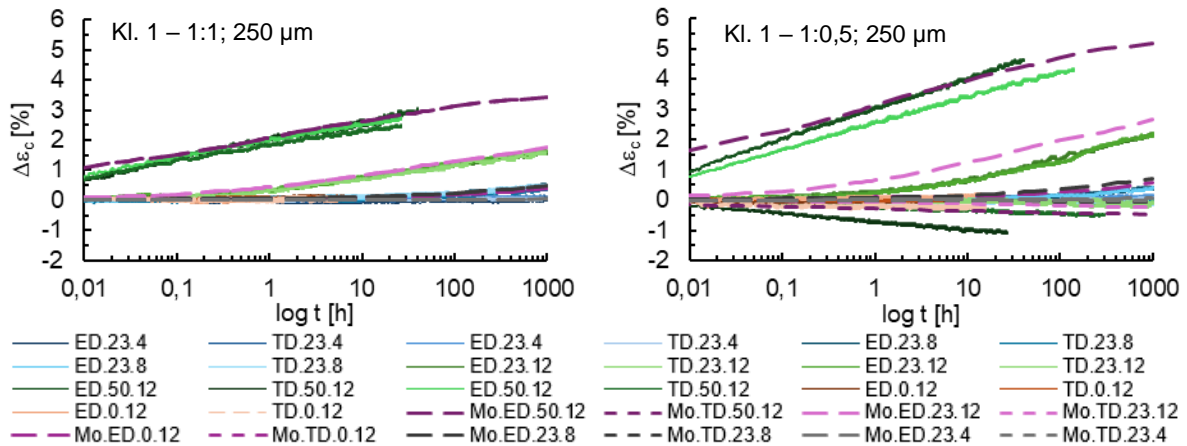


Bild 5 Analytische Berechnung des biaxialen Kriechverhaltens von ETFE-Folien basierend auf der Referenznachgiebigkeit bei $T_{ref} \oplus \sigma_{ref}$ und der Temperatur-Spannungs-Zeit-Verschiebung infolge der Spannungsverhältnisse 1:1 und 1:0,5 (Bez.: „Richtung.Temperatur[°C].Spannung[N/mm²]“)

Für die biaxialen Relaxationsversuche wurde eine neue, reduzierte kreuzförmige Probekörperform entwickelt, da in biaxialen Kreuzproben mit langen Armen der Relaxationsprozess nicht ausschließlich auf das biaxial beanspruchte mittlere Feld der

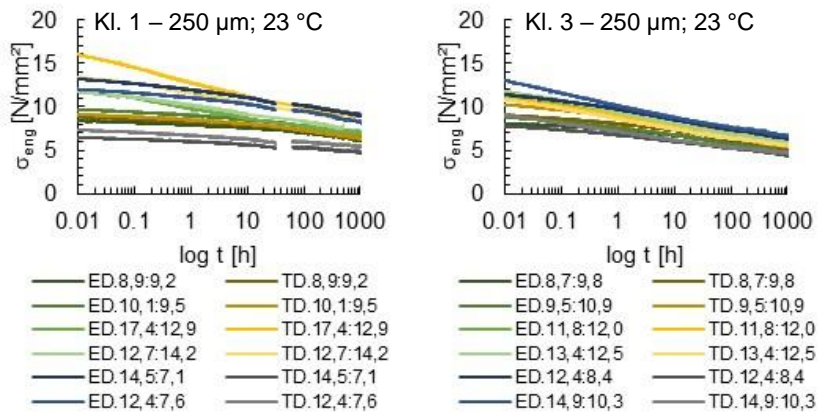


Bild 6 Relaxationsverhalten von ETFE-Folien infolge biaxialer Spannungsverhältnisse (Bez.: „Richtung.σI-σII[N/mm²]“)

Kreuzproben begrenzt werden konnte. Bild 6 stellt beispielhaft das Relaxationsverhalten infolge biaxialer Spannung dar. Zu erkennen ist, dass nach 1.000 h konstanter Dehnung die Relaxation im biaxialen Spannungszustand geringer ist als im monoaxialen Spannungszustand. So relaxieren die Folienprodukte auf ein Spannungsniveau > 5 N/mm² in 1:1 Spannungszuständen. Sowohl im mono- als auch biaxialen Relaxationsprozess hängt die Relaxation von der initialen Spannung bzw. initialen Dehnung ab.

Konsolidierung des Kurz- und Langzeitzugverhaltens

Zuletzt wurden die erarbeiteten Modelle zur Beschreibung des Kurz- und Langzeitzugverhaltens kombiniert. Hierbei werden die einzelnen Komponenten aufaddiert, sodass das

Materialverhalten sowohl in mono- als auch biaxialen Spannungszuständen basierend auf einem monoaxialen Spannungszustand belastungs-, temperatur- und klassenabhängig modelliert werden kann, siehe Gl. (4).

$$\begin{aligned}\varepsilon_{I, \text{biax}}(\sigma(t), T, \text{Kl.}, R_I, R_{II}, R_{I,c}, R_{II,c}, \nu) &= \varepsilon_{\text{mono}}(\sigma, f_{ve}(T, \nu, \text{Kl.}), f_y(T, \nu, \text{Kl.})) (R_I - \nu R_{II}) \\ &\quad + \Delta \varepsilon_{c, \text{mono}}(\sigma_c, t) [R_{I,c} - \nu R_{II,c}] \\ \varepsilon_{II, \text{biax}}(\sigma(t), T, \text{Kl.}, R_I, R_{II}, R_{I,c}, R_{II,c}, \nu) &= \varepsilon_{\text{mono}}(\sigma, f_{ve}(T, \nu, \text{Kl.}), f_y(T, \nu, \text{Kl.})) (-\nu R_I + R_{II}) \\ &\quad + \Delta \varepsilon_{c, \text{mono}}(\sigma_c, t) [-\nu R_{I,c} + R_{II,c}]\end{aligned}\quad (4)$$

Zur Validierung wurden Langzeitversuche mit steigender Temperatur durchgeführt. In Bild 7 sind Vergleiche zwischen den analytischen Modellen und den experimentellen Ergebnissen dargestellt, an denen eine gute Modellapproximation des temperaturabhängigen Materialverhaltens zu erkennen ist. Während im Experiment eine kurzfristige Abkühlung der Probe keinen signifikanten Einfluss auf das Dehnverhalten zeigt, ist dieser Temperatureinfluss im analytischen Modell deutlich zu erkennen, sodass zukünftig zum Abfangen dieses Einflusses ein Dämpfungsfaktor in die Modellfunktion implementiert werden muss.

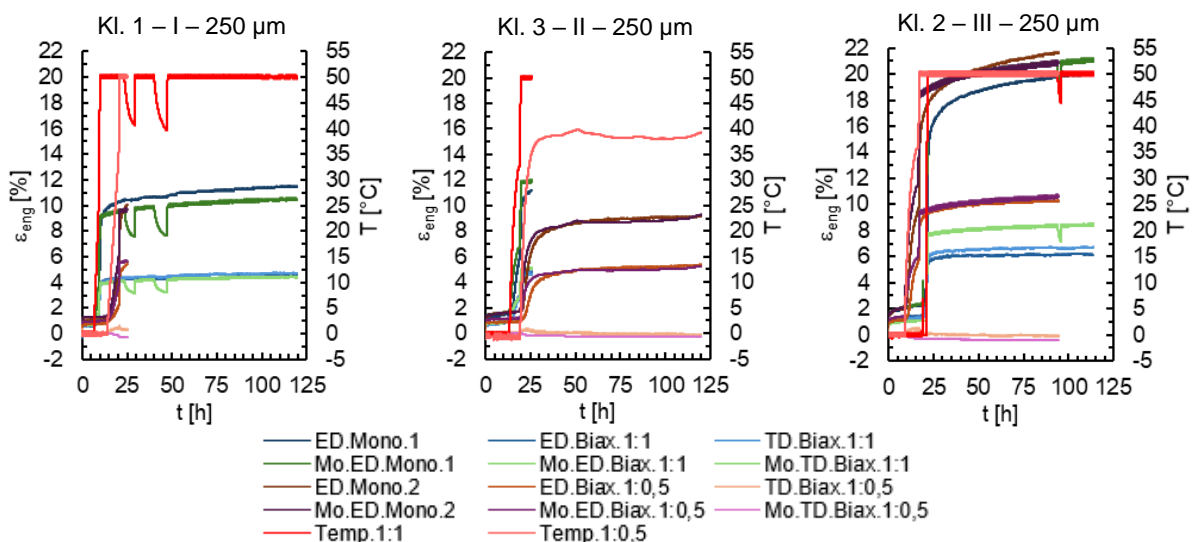


Bild 7 Gegenüberstellung der entwickelten analytischen Modelle und den Messwertkurven in den Spannungsverhältnissen 1:0, 1:1 und 1:0,5 bei $\sigma(t) = 12 \text{ N/mm}^2$

Umgang mit Forschungsdaten

Die in dem Forschungsvorhaben generierten Forschungsdaten werden auf den Messwertrechnern als Rohdaten sowie in gesammelten Archiven auf gesicherten institutseigenen Servern gespeichert.

Literaturverzeichnis

- [1] Moritz, K., ETFE-Folie als Tragelement, Dissertation, Technische Universität München, 2007
- [2] Wu, M. et al., Statistical Characteristics of Ethylene Tetrafluoroethylene Foils' Mechanical Properties and Its Partial Safety Factors, J. Mater. Civ. Eng. 28 (2016), Heft 5
- [3] Hu, J. et al., Uniaxial tensile mechanical properties and model parameters determination of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils, Constr. Build. Mater. 75 (2015), S. 200-207
- [4] Zhao, B., Chen, W., Experimental study and constitutive modelling on viscoelastic-plastic mechanical properties of ETFE foils subjected to uniaxial monotonic tension at various strain rates, Constr. Build. Mater. 263 (2020), 120060

- [5] Zhao, B., Chen, W., Rate-dependent mechanical properties and elastic modulus of ETFE foils used in inflated forming of transparency air-inflated cushion membrane structures, *Eng. Struct.* 227 (2021), 111404
- [6] Sun, G. et al., Experimental investigation of the uniaxial tensile properties and thermal deformation of ETFE membrane at different temperatures, *Constr. Build. Mater.* 327 (2022), 126944
- [7] DIN EN 1990:2021-10, Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, DIN e.V., Beuth Verlag, Berlin, 2021
- [8] prCEN/TS 19102:2023-04, Design of tensioned membrane structures (Final Draft), CEN, Brüssel, 2023
- [9] Schiemann, L., Tragverhalten von ETFE-Folien unter biaxialer Beanspruchung, Dissertation, Technische Universität München, 2009
- [10] Galliot, G., Luchsinger, R. H., Uniaxial and biaxial mechanical properties of ETFE foils, *Polym. Test.* 30 (2011), S. 356-365.
- [11] Li, Y., Wu, M., Uniaxial creep property and viscoelastic-plastic modelling of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foil, *Mech Time-Depend Mater* 19 (2015), S. 496-506
- [12] Zhao, B. et al., Uniaxial tensile creep properties of ETFE foils at a wide range of loading stresses subjected to long-term loading, *Constr. Build. Mater.* 253 (2020), 119112
- [13] Beck, P. Th. J., Zum zeit- und temperaturabhängigen Werkstoffverhalten von Ethylen/Tetrafluorethylen-Folien im Hochbau, Dissertation, TU Darmstadt, Darmstadt, 2021
- [14] Hanke, T., Viskoelastische Beschreibung des Langzeit-Kriechverhaltens von Ethylen-Tetrafluorethylen (ETFE) Folien für Membrankissen-Konstruktionen, Dissertation, Fraunhofer-Institut für Mikrostrukturen von Werkstoffen und Strukturen IMWS, Halle (Saale), 2016
- [15] Schapery, R. A., On the Characterization of Nonlinear Viscoelastic Materials, *Polym. Eng. Sci.* 9 (1969), Heft 4, S. 225-318
- [16] Williams, M. L. et al., The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids, *J. Am. Chem. Soc.* 77 (1955), S. 3701-3707
- [17] Papanicolaou, G. C., Zaoutos, S. P., Viscoelastic constitutive modelling of creep and stress relaxation in polymers and polymer matrix composites, in: Guedes, R. M. (Ed.), *Creep and fatigue in polymer matrix composites*, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, UK, 2011
- [18] Lippke, R., Folien als transparente Elemente in der Fassade: Mechanische und bauphysikalische Eigenschaften, Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2009
- [19] Hartz, C., Luftdruckgesteuerte Transformation an flexibel berandeten Folienkissen, Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2014
- [20] Li, Y., Wu, M., Biaxial creep property of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foil, *Struct. Eng. Mech.* 54 (2015), Heft 5, S. 973-986

4 Veröffentlichte Projektergebnisse

4.1 Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung

- [21] Surholt, F., Uhlemann, J., Stranghöner, N., Temperature and Strain Rate Effects on the Uniaxial Tensile Behaviour of ETFE Foils, *Polymers* 14 (2022), 3156, DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14153156> (Open-Access)
- [22] Surholt, F., Runge, D., Uhlemann, J., Stranghöner, N., Mechanisch-technologisches Verhalten von ETFE-Folien und deren Schweißverbindungen, *Stahlbau* 91 (2022), Heft 8, S. 513-523, DOI: <https://doi.org/10.1002/stab.202200039>

4.2 Weitere Publikationen und öffentlich gemachte Ergebnisse

- [23] Stranghöner, N., Surholt, F., Runge, D., Uhlemann, J., European ETFE-Design – New findings and concepts, in: *Proc. Structural Membranes 2021*, München, Deutschland, 13-14 September, 2021
- [24] Surholt, F., Runge, D., Uhlemann, J., Stranghöner, N., Mechanisch-technologische Eigenschaften von ETFE-Folien und deren Schweißverbindungen, in: Stranghöner, N., Uhlemann, J. (Hrsg.), *5. Essener Membranbau Symposium*, Shaker Verlag, Düren, 2022
- [25] Surholt, F., Uhlemann, J., Stranghöner, N., Defining design limits for ETFE foils determined in bubble inflation tests, in: *Proc. IASS Annual Symposium 2023*, Melbourne, Australien, 10-14 Juli, 2023, S. 2158-2169
- [26] Surholt, F., Uhlemann, J., Stranghöner, N., Correlation Between Uniaxial and Biaxial Creep Behaviour of ETFE Foils, in: *Proc. Structural Membranes 2023*, Valencia, Spanien, 2-4 Oktober, 2023

4.3 Patente (angemeldete und erteilte)

Keine

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/82126

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20240627-140908-4

Alle Rechte vorbehalten.