

11 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird das Tragverhalten von VSG aus Floatglas (2 x 4mm) untersucht. Im Vordergrund steht hierbei die experimentelle Überprüfung des Einflusses klimatischer Einwirkungen - UV-Strahlung, Feuchte und Temperatur - auf die Alterungsbeständigkeit der PVB-Folie (amorpher, unvernetzter Thermoplast, Produkt: TROSIFOL MB) und das Schubverhalten. Zusätzlich wird eine materielle Degradation infolge Dauerschwingbeanspruchung untersucht. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen und einer FE-Parameterstudie an großen, liniengelagerten VSG-Scheiben, wird ein Bemessungsvorschlag vorgestellt.

Darüber hinaus wird das Schub- bzw. das Kriechverhalten der viskoelastischen Zwischenfolie ($d_{\text{PVB}} = 0,76 \text{ mm}$) untersucht. Die erzielten Versuchsergebnisse dienen hierbei zur Entwicklung eines Materialgesetzes für die PVB-Folie in Abhängigkeit von der Zeit und der Temperatur. Daneben wird - experimentell und numerisch - auf die Tragwirkung von großen, liniengelagerten VSG-Platten eingegangen. Daraufhin werden eigene Ansätze zur Berechnung von VSG-Scheiben zur Diskussion gestellt.

Zum einen wurden einachsige Scherversuche an kleinformatischen, ungealterten und gealterten VSG-Proben (Bohrkerne, $\varnothing = 31 \text{ mm}$) durchgeführt. Zum anderen erfolgten zügige sowie langzeitliche Biegeversuche an großen, einachsig sowie zweiachsig lastabtragenden (ungealterten) VSG-Platten (1100 x 360 mm bzw. 2000 x 1000 mm). Es handelte sich hauptsächlich um Grundlagenuntersuchungen, d.h. ohne statistische Absicherung (z.B. Fraktilwerte).

Es erfolgte eine numerische Nachrechnung der (Dauerstands-)Biegeversuche und ein Vergleich der Versuchsergebnisse mit derzeitigen Berechnungsvorschlägen unter Einbeziehung derzeitiger Bemessungsvorgaben.

Im folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse bzw. Erkenntnisse dieser Arbeit stichpunktartig zusammengefaßt:

- In Bezug auf klimatische Einwirkungen stellen hohe Feuchtegehalte, kombiniert mit hoher Temperatur in der Umgebung, einen wesentlichen Einfluß auf den Randbereich von VSG-Scheiben dar (9 bis 10 cm von der Kante). Hierbei kommt es zum Eindringen von Feuchtigkeit über die Glaskanten in die hygroskopische PVB-Folie (langzeitlicher Prozeß) und damit zu einer starken Reduzierung der Foliensteifigkeit.
- Infolge eines durch Feuchte gestörten Randbereiches der PVB-Folie können jedoch tragsicherheitsgefährdende Konsequenzen für großformatige, liniengelagerte VSG-Scheiben, ob als Überkopf- oder Vertikalverglasung, im baupraktisch relevanten Bereich (Schubwinkel $\gamma \leq 0,9 \text{ rad}$) ausgeschlossen werden. Bei druckbeanspruchten Traggliedern können aber Stabilitätsprobleme auftreten.
- Eine Alterung und damit eine Veränderung des Scherverhaltens infolge andauernder Schwingungsbeanspruchung konnte im Rahmen der untersuchten Parameter nicht festgestellt werden.

- Das viskoelastische Relaxationsverhalten der PVB-Folie ist besonders ausgeprägt bei Temperaturen zwischen 10 °C und 30 °C (im Transformationsübergangsbereich T_g der PVB-Folie). Bei höheren und niedrigeren Temperaturen tritt es weniger stark hervor.
- Scher- und Biegetragverhalten sind abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit. Für niedrige und erhöhte Temperaturen (< 10 °C und > 50 °C) nimmt dieser Einfluß weitgehend ab. Im Kurzzeit-Bereich ($t < 60$ s) und bei zügiger Belastung kann näherungsweise von einem konstanten Schubmodul ausgegangen werden, dessen Höhe von der Temperatur und der Belastungsgeschwindigkeit abhängt.
- Bei einachsig gespannten VSG-Platten, kann ab Gleitmoduli $> 3,0$ N/mm² grundsätzlich von einer vollen Verbundwirkung ausgegangen werden. In diesem Fall sollte die Gesamthöhe aus Summe der Einzelglasscheiben zzgl. Foliendicke ($h_{\text{ges}} = \Sigma h_{\text{Glas}} + \Sigma d_{\text{PVB}}$) berechnet werden. Aufgrund einer Zunahme der statischen Höhe weist VSG dann ein steiferes Tragverhalten auf als ein monolithischer Querschnitt mit vergleichbarer Dicke.
- Für dieselben Systeme kann bei Raumtemperatur (23 °C) und kurzzeitiger Lasteinwirkung ($t < 60$ s) ein Teilverbund angenommen werden. Für mittelfristige und länger andauernde Einwirkungen ($t > 60$ s) sollte kein Schubverbund berücksichtigt werden.
- Weiterhin ist bei erhöhter Temperatur ($T = 40$ °C) und einer Lastdauer $t < 5$ s ebenfalls ein Teilverbund festzustellen. Für längere Belastungen ist ein erheblich reduzierter bis gar kein Schubverbund mehr feststellbar.
- Für einachsig gespannte VSG-Platten sind geringe Membraneffekte zu registrieren. Bei einem niedrigen Schubmodul und somit höherer Durchbiegung ist ein stärkeres Auftreten von Membraneffekten zu erkennen.
- Bei zweiachsigem Lastabtrag zeigt sich ab einem G-Modul $> 3,0$ N/mm² in der Haupttragrichtung kein merklicher Unterschied zwischen geometrisch linearer und nichtlinearer Berechnung. Für einen G-Modul $< 2,0$ N/mm² weicht die lineare Lösung von der nichtlinearen Lösung hierbei deutlich ab.
- Für höhere Lastniveaus und damit größere Verformungen existiert ein erheblicher Unterschied zwischen linearer und nichtlinearer Lösung. Vorhandenes Kriechen wird durch den Membranspannungszustand „aufgefangen“.
- Mit den z.Zt. vorhandenen, zulässigen Bemessungsgrenzen ergeben sich bei der Berechnung von Vertikal- bzw. Überkopfverglasungen aus VSG große Sicherheitsabstände im Vergleich zur realen Traglast (Faktor 3 bis 9).
- Hauptversagen der VSG-Einheiten wurde jeweils durch Bruch der unteren Glasscheibe ausgelöst. Die obere Scheibe und eine zugbeanspruchte Zwischenfolie waren, unabhängig von der Temperatur in der Lage, einen erneuten Lastanstieg herbeizuführen (gutes Resttragfähigkeitsverhalten). Die Splitter blieben fast ausnahmslos an der PVB-Folie haften.
- Für die Messung der jeweiligen Scheiben- und Foliendicken ergaben sich Untertoleranzen. Es können sich Ergebnisunterschiede von etwa 10 % ergeben, falls bei einer Berechnung statt der nominellen die tatsächlichen Dicken angesetzt wird.

Ausblick

Die Arbeit behandelt vorwiegend tragsicherheitsrelevante Alterungseinflüsse für liniengelagerte VSG-Scheiben. Weitere Untersuchungen sind für punktgelagerte VSG-Konstruktionen erforderlich, um z.B. Feuchteintritt und Delamination im Bereich des Punkthalters auf mögliche Konsequenzen für die Sicherheit zu überprüfen.

Eine Bestimmung des Tragverhaltens von großformatigen, gealterten VSG-Scheiben wurde lediglich für kurzzeitige Lasteinwirkung vorgenommen. Für Informationen unter langzeitlicher Beanspruchung sind weitergehende Arbeiten notwendig.

Da VSG heutzutage auch für druckbeanspruchte Tragglieder (z.B. Stützen) im Außenbereich eingesetzt wird, ergibt sich Klärungsbedarf für das Tragverhalten bzw. die Stabilität bei einem im Randbereich durch Feuchte verursachten Folienausfall.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Scherverhalten von VSG (bis zu einem begrenzten Scherwinkel) unter dem Einfluß verschiedener Parameter geprüft. Die hierbei gewonnenen Informationen lieferten allerdings keine Aussagen hinsichtlich einer Beanspruchbarkeit bei Zugbelastung normal zur Glasoberfläche. Es existiert eine gewisse Korrelation zwischen Kompressionsschertests und Peel-Tests, die vorwiegend zur Bestimmung des Haftverbundes bzw. der Haftzugfestigkeit PVB-Folie - Glas verwendet werden. Hierzu ist weitere Forschungsbedarf gegeben.

Der Kontakt der PVB-Folie mit anderen Dichtungs- und Verklebungsmaterialien (z.B. Silikon) führt bekanntlich zu Delamination, die in diesen Bereichen bis zu 10 cm von der Kante ins Innere von VSG eintreten kann. Bisher existieren keine wissenschaftlich fundierten Untersuchungen zu diesem Thema.

Die bisherige Entwicklung eines Bemessungsschubmoduls für klimatische Einwirkungen (Korrelationsanalyse aus Windlast und PVB-Temperatur) in [183] basiert auf den Näherungsformeln aus [192] und dem Ansatz eines pauschalen Alterungsfaktors für die Verminderung der Verbundwirkung von 15 %. Für eine effizientere Ausnutzung wird vorgeschlagen, den in [183] zur Diskussion gestellten Schubmodul unter Verwendung der Erkenntnisse dieser Arbeit - vorwiegend im Zeitbereich $1 \text{ s} \leq t \leq 10 \text{ s}$ und einer Temperatur zwischen 10 °C und 30 °C - zu modifizieren. Darüber hinaus könnte beim Ansatz eines Alterungsfaktors entsprechend differenziert werden.

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte zeit- und temperaturabhängige Materialgesetz für die PVB-Folie basierte auf Untersuchungen mit dem Folienprodukt TROSIFOL MB. Da Versuche an anderer Stelle gezeigt haben, daß das Verbundverhalten u.a. vom PVB-Folientyp abhängt, ist eine Übertragbarkeit des Stoffgesetzes auf die Folien anderer Hersteller zu überprüfen.