Bemessung und Ausführung von Membrantragwerken nach prCEN/TS 19102

Der vorliegende Beitrag spiegelt die fortschreitende Entwicklung der ersten europäischen Bemessungsnorm für den Membranbau wider. Sie wird als CEN/TS 19102 "Design of tensioned membrane structures" veröffentlicht werden. Neben Bemessungsregeln wird sie übergangsweise u. a. auch auf das Bemessungskonzept abgestimmte Ausführungsregeln beinhalten. Der aktuelle Stand der geplanten Regelungen dieser beiden Teilbereiche wird im Beitrag präsentiert.

Stichworte Membranbau; Bemessungsnorm; Ausführung

1 Entwicklungsstand der prCEN/TS 19102

Seit einigen Jahren wird die erste europäische Bemessungsnorm für den Membranbau durch eine Vielzahl von Experten erarbeitet. Die Autoren haben an mehreren Stellen über die Entwicklung berichtet [1-3]. Der Normentwurf wird seit 2020 unter der Nummer prCEN/TS 19102 "Design of tensioned membrane structures" geführt. Die letzte vom zuständigen Project Team eingereichte Version datiert von November 2021 [4]. Sie wird derzeit von der CEN/TC 250 Working Group 5 "Membrane Structures" und den nationalen Spiegelausschüssen abgestimmt. Nun neigt sich die Entwicklung der finalen Phase entgegen, in welcher die Norm übersetzt und der Entwurf in den CEN-Mitgliedsstaaten veröffentlicht wird. Dieser kann und soll nach Veröffentlichung von der Fachöffentlichkeit kommentiert werden. Die Einarbeitung der Kommentare wird schließlich die vorläufige "pr"-Fassung in die finale Fassung der CEN/TS 19102 überführen.

Neben dem Kernanliegen der Norm, Bemessungs- und Konstruktionsregeln für Membrantragwerke zur Verfügung zu stellen, wurden zusätzlich auf das Bemessungskonzept abgestimmte Ausführungsregeln und Versuchsprozeduren geschaffen. Diese werden in Form von informativen oder auch normativen Anhängen Teile der prCEN/TS 19102. Zu einem späteren Zeitpunkt – im Zuge der erhofften Überführung der CEN/TS in einen Eurocode für Membrantragwerke – sollen diese dann in eigenständige Normen überführt werden, sodass sich die Bemessungsnorm auf ihren Kernteil reduzieren wird.

Der vorliegende Beitrag erläutert den aktuellen Stand der Entwicklungen hinsichtlich Bemessung und Ausführung und gibt damit bereits einen Einblick. Die Diskussionen

Design and execution of membrane structures according to prCEN/TS 19102

This paper reflects the progressive development of the first European design standard for membrane structures. It will be published in future as CEN/TS 19102 "Design of tensioned membrane structures". In addition to design rules, it will also contain interim execution rules based on the design concept. The current status of the planned regulations in these two areas is presented in this article.

Keywords membrane structures; design standard; execution

in den Gremien werden aber weiterhin lebhaft geführt. Dies bedeutet, dass sich der Stand vor der Einführung noch in Teilen verändern kann. Die Autoren erwarten, dass dies weniger die Bemessungsregeln als v. a. die Ausführungsregeln betreffen wird, die zuletzt noch intensiv diskutiert wurden.

2 Bemessung von Textil- und Folientragwerken

2.1 Allgemeines

Hauptziel der prCEN/TS 19102 ist die Regelung der Bemessung von Membrantragwerken sowohl aus (beschichteten) Textilien als auch aus technischen Folien. Basis aller Regelungen ist DIN EN 1990 [5]. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags werden zu [3] ergänzende Erläuterungen gegeben oder zwischenzeitlich veränderte Regelungen präsentiert.

Bei allen Membrantragwerken werden zwei Teilsicherheitsbeiwerte auf der Widerstandseite unterschieden: γ_{M0} für den Nachweise des Grundmaterials und γ_{M1} für den Nachweis von Verbindungen.

Grundsätzlich gilt, dass die aus den Nachweisen im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit abgeleiteten erforderlichen Festigkeiten projektspezifisch vom Tragwerksingenieur ermittelt und kommuniziert werden. Diese Festigkeiten sind später von Materialherstellern und Konfektionären zu liefern und experimentell nachzuweisen, siehe auch die Erläuterungen zu den Ausführungsregeln weiter unten.

Im vorliegenden Beitrag werden die vielfältigen Regelungen der prCEN/TS 19102 aus Platzgründen nicht vollumfänglich dargestellt und auf die wesentlichen Prinzipien

reduziert. prCEN/TS 19102 sieht teilweise weitere Optionen vor, um die Nachweisführung genauer oder individueller zu ermöglichen.

2.2 **Bemessung von Textiltragwerken**

2.2.1 Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei gewebten Tragelementen werden grundsätzlich Bemessungswerte der Membranspannungen in den Fadenrichtungen den Bemessungswerten der Festigkeiten gegenübergestellt.

Festigkeitseinbußen von beschichteten Geweben durch unterschiedliche physikalische Einflüsse, im Wesentlichen hohe Temperatur, Bewitterung und Langzeitbelastung, werden durch Modifikationsfaktoren berücksichtigt. Diese müssen experimentell für individuelle Materialien oder Verbindungsarten bestimmt werden. Generell ist Gl. (1) einzuhalten:

$$f_{\rm Ed} \le f_{\rm Rd} \tag{1}$$

f_{Ed} ist die maßgebende Bemessungsspannung in der betrachteten Richtung (Nachweise in Kett- und Schussrichtung sind getrennt voneinander zu führen), f_{Rd} ist das Minimum der in monoaxialen Kurzzeit-Zugversuchen bei Raumtemperatur T = 23°C gemessenen Material- oder Schweißnahtbruchfestigkeit inkl. der zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte und der o. g. Modifikationsfaktoren. Im Falle von PVC-beschichteten Polyestergeweben (PES-PVC) oder PTFE-beschichteten Glasfasergeweben (Glas-PTFE) wird für das Material $\gamma_{M0} = 1,4$ angesetzt, für die Schweißnaht $\gamma_{M1} = 1,5$.

Die situationsbedingte Bemessungsfestigkeit f_{Rd} wird durch Division der charakteristischen Kurzzeit-Zugfestigkeit bei T = 23 °C durch den je nach zu führendem Nachweis entsprechenden Teilsicherheitsbeiwert y sowie die zur entsprechenden Bemessungssituation gehörenden Modifikationsfaktoren berechnet. Die folgende Gl. (2) stellt dies dar, wobei hier für die Einführung alle Modifikationsfaktoren gezeigt sind:

$$f_{\rm Rd} = \frac{f_{\rm Rd}}{\gamma_{\rm M} \cdot k_{\rm biax} \cdot k_{\rm age} \cdot k_{\rm dur,*} \cdot k_{\rm temp,*} \cdot k_{\rm size} \cdot k_{\rm x}}$$
(2)

mit

Modifikationsfaktor für biaxiale Effekte

 $k_{\rm biax}$ Modifikationsfaktor für Umwelteinflüsse (Alte k_{age} rung)

Modifikationsfaktor für Einflüsse aus verschiede $k_{
m dur,*}$ nen Lastdauern (permanent, langzeitig, mittellang, kurzzeitig (Vorsicht: mit kurzzeitig ist hier eine "vergleichsweise kurz wirkende Langzeitbelastung" gemeint; die sich ergebende Festigkeit ist nicht zu verwechseln mit der Kurzzeitzugfestigkeit))

Modifikationsfaktor für Temperatureffekte (pro $k_{\text{temp,*}}$ jektspezifisch festzulegen, regelmäßig auf der sicheren Seite liegend gewählt zu 70°C)

Modifikationsfaktor zur Berücksichtigung der $k_{\rm size}$ Größe von Membranpaneelen (wird in Deutschland über den Nationalen Anhang zu stets 1,0 gesetzt werden)

Variable für Modifikationsfaktoren für noch $k_{\rm x}$ nicht spezifizierte Effekte

Tab. 1 stellt dar, welche der dargestellten Modifikationsfaktoren in welchen Bemessungssituationen anzusetzen sind. Sie gibt außerdem empfohlene Wertebereiche für die am häufigsten eingesetzten textilen Membranen, die PVC-beschichteten Polyestergewebe. Die Werte $k_{\rm biax}$ und $k_{\rm age}$ sind in allen Bemessungssituationen anzuwenden, da stets von biaxialen Spannungszuständen ausgegangen wird und auf der sicheren Seite liegend stets der Nachweis für gealtertes Material zu führen ist. Die in Tab. 1 gegebenen Werte liegen in gewissen Bandbreiten. Die Variationen hängen ab von den verschiedene Materialien und Festigkeitstypen (k_{age} , k_{dur} *, $k_{\text{temp},70}$), vom Spannungszustand (k_{biax}) oder auch von der Lokalität eines individuellen Tragwerks (k_{age}) . Wenn nicht jeweils die angegebenen Höchstwerte im Nachweis angesetzt werden, müssen die gewählten niedrigeren Werte experimentell nachweisbar oder plausibel sein. Mit "Plausibilität" ist v. a. der Wert k_{biax} gemeint, der zu 1,0 gesetzt werden kann, wenn einem Nachweis ein nahezu monoaxialer Spannungszustand zugrunde liegt, wie er regelmäßig in antiklastisch - also gegensinnig - geformten Membranen auftritt. Zur Bestimmung der k-Faktoren wird prCEN/TS 19102 einen normativen Anhang enthalten, der passende Versuchsverfahren vorschlägt.

k-Faktoren in Bemessungssituationen des GZT für Gewebetragwerke, Werte bzw. Wertebereiche für die k-Faktoren von PVC-beschichteten Polyestergeweben

k-factors in design situations of the ULS of fabric structures, values or ranges of values for k-factors of PVC-coated polyester fabrics

Bemessungssituation		$k_{\text{biax}} = 1,0-1,2$	$k_{\rm age}=1,1-1,4$	$k_{\text{dur,p}} = 1,4-1,8$	$k_{\rm dur,L} = 1,3-1,7$	$k_{\text{dur,M}} = 1,1-1,2$	$k_{\text{temp},70} = 1,5-2,0$	$k_{\rm size} = 1,0$
1	Vorspannung	х	Х	х			х	х
2	Zeitweise erhöhte Vorspannung (pneumatisch)	X	X		X		X	х
3	Schnee > 1000 m Höhenlage	X	X		X			X
4	Schnee ≤ 1000 m Höhenlage	X	X			X		X
5	Wind	x	X					x
6	Wind bei erhöhter Temperatur	X	X				X	X

2.2.2 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Verformungen der Membrane sollen berechnet werden. Allgemeine Verformungsgrenzen werden keine angegeben, sie sollen zwischen den Vertragsparteien individuell festgelegt werden. Die Membranen dürfen allerdings an keine anderen Bauteile anschlagen, da dies zu Beschädigungen der Membrane führen kann, die sich zu Rissen aufweiten und schließlich zum Versagen führen können.

Schnee- und Wassersackbildung auf den Membranflächen sollte vermieden werden. Wenn dies nicht an allen Stellen sichergestellt werden kann, muss eine detaillierte Verformungsberechnung durchgeführt werden, mit realistischen Größen für die Schnee-, Wasser- oder Eisakkumulation im wachsenden Durchhang. Für diese Verformungsberechnung wird empfohlen, untere Grenzwerte der Materialsteifigkeiten und zusätzlich auch einen reduzierten Vorspannungszustand anzusetzen.

Faltenbildung in Membranen ist sowohl aus ästhetischen als auch technischen Gründen unerwünscht. Das Auftreten einer Falte signalisiert örtlich zu geringe Vorspannungen. Dies kann unter Windlasten zu Flattern führen und die Membrane auf Dauer beschädigen. Allerdings können Falten nicht immer vollkommen vermieden werden. So können bspw. unweigerlich Falten in spitz zulaufenden Eckbereichen entstehen. Daher fordert prCEN/TS 19102 nicht das vollständige Vermeiden von Falten, sondern die Reduktion so weit möglich. Die Bewertung sollte stets projektspezifisch stattfinden. Hohe Unterschiede in den Hauptspannungen sollten sowohl im Vorspannungszustand als auch unter Extrembelastungen vermieden werden, um die Faltenbildung nicht zu fördern.

Die Vorspannung, gemeint ist hierbei der nominelle Wert der Vorspannung, die der Tragwerksingenieur festlegt, sollte über die gesamte Lebensdauer der Membrane gesichert sein. Durch Relaxation sowie durch irreversible Dehnungen nach äußeren Belastungen reduziert sich die Vorspannung mit der Zeit. Dies kann durch eine gewisse "Überspannung" während der Installation oder durch eine nachspannbare Konstruktion kompensiert werden. Für ausreichende Kompensation werden im Membranbau Kompensationswerte bestimmt, um die die Membrane - vereinfacht dargestellt - vor dem Einbau gekürzt wird, um so eine etwas höhere Anfangsvorspannung zu erreichen. Zur Bestimmung der Kompensationswerte verweist prCEN/TS 19102 auf die neue europäische Norm EN 17117-2 [6]. Diese gibt der Kompensationswertbestimmung anhand von biaxialen Zugversuchen einen geeigneten Rahmen. Dieser besteht u.a. aus "Bausteinen", aus denen für ein individuelles Projekt ein geeignetes Lastprotokoll erstellt werden kann, sowie aus einem Leitfaden für die Auswertung der Versuche. Die Norm lässt den Ausführenden dabei aber bewusst viel Spielraum und macht keine einengenden oder alternativlosen Bestimmungen. Letztlich bleibt die Bestimmung von Kompensationswerten für die unterschiedlichen Materialien des

Membranbaus sehr komplex und stark abhängig von den Erfahrungen des ausführenden Ingenieurs. Gibson [7] gibt einen Einblick in die Komplexität.

Die letzte Gebrauchstauglichkeitsbestimmung der prCEN/TS 19102 betrifft die Kontrolle von Rissen. Bei der regelmäßigen Wartung soll die Membrane auf Risse (gemeint sind kleine Anfangsrisse) überprüft werden. Risse sollten (möglichst frühzeitig) fachgerecht repariert werden, bspw. durch Aufbringen von Flicken, oder die Membrane muss getauscht werden.

2.3 Bemessung von Folientragwerken

2.3.1 Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) wird der Nachweis des Materials bzw. der Schweißnaht gegen Bruch geführt. Dabei muss nach Gl. (3) gelten:

$$f_{\rm Ed} \le f_{\rm Rd.mod} \tag{3}$$

 $f_{\rm Ed}$ ist die maßgebende Bemessungsspannung, $f_{\rm Rd}$ ist das Minimum der in monoaxialen Kurzzeit-Zugversuchen bei Raumtemperatur $T=23\,^{\circ}{\rm C}$ gemessenen Material- und Schweißnahtbruchfestigkeit inkl. der zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte. Im Falle von ETFE-Folien wird für das Material $\gamma_{\rm M0}=1,1$ angesetzt, für die Schweißnaht $\gamma_{\rm M1}=1,15$. Für ETFE-Folien darf ohne weitere Versuche von folgenden Festigkeiten ausgegangen werden: für das Material $f_{\rm 1Rd}=40$ MPa, für die Schweißnaht $f_{\rm 2Rd}=30$ MPa. Damit wird für ETFE-Folien nach heutigem Stand der Schweißtechnologie stets die Bruchfestigkeit an der Schweißnaht maßgebend.

Der maßgebende Festigkeitswert muss je nach Bemessungssituation noch zu $f_{\rm Rd,mod}$ modifiziert werden. Dies geschieht auch hier über verschiedene Modifikationsfaktoren k (Tab. 2). Die Modifikation berücksichtigt bspw. hohe Temperaturen einer Bemessungssituation im Sommer oder die festigkeitsmindernde Wirkung lang anhaltender Lasten aus Schnee oder Wassersack (Gl. (4)):

$$f_{\text{Rd.mod}} = \frac{f_{\text{Rd}}}{k_{\text{biax}} \cdot k_{\text{age}} \cdot k_{\text{dur,*}} \cdot k_{\text{temp,*}} \cdot k_{\text{QL}} \cdot k_{\text{x}}}$$
(4)

mit

 k_{biax} Modifikationsfaktor für biaxiale Effekte

 k_{age} Modifikationsfaktor für Umwelteinflüsse (Alterung)

k_{dur,*} Modifikationsfaktor für Einflüsse aus verschiedenen Lastdauern (permanent, langzeitig, mittellang, kurzzeitig (Vorsicht: mit kurzzeitig ist hier eine "vergleichsweise kurz wirkende Langzeitbelastung" gemeint, die sich ergebende Festigkeit ist nicht zu verwechseln mit der Kurzzeitzugfestigkeit))

 $k_{\text{temp},*}$ Modifikationsfaktor für Temperatureffekte (0°C, 40°C oder 50°C)

- k_{QL} Modifikationsfaktor zur Berücksichtigung des Qualitätslevels des Konfektionärs, nur anzuwenden beim Nachweis der Schweißnaht
- $k_{\rm x}$ Variable für Modifikationsfaktoren für noch nicht spezifizierte Effekte

Die Modifikationsfaktoren sind grundsätzlich situationsbedingt zu verwenden. Tab. 2 verdeutlicht, welche Modifikationsfaktoren in welchen Bemessungssituationen anzusetzen sind. Die Werte k_{biax} und k_{age} sind in allen Bemessungssituationen anzuwenden, da stets von biaxialen Spannungszuständen ausgegangen wird und auf der sicheren Seite liegend stets der Nachweis für gealtertes Material zu führen ist. Bei ETFE-Folien können beide Werte allerdings zu 1,0 angenommen werden, da für diese Folien - im Gegensatz zu gebräuchlichen Geweben - Festigkeitsabnahmen weder aus biaxialen Spannungszuständen noch aus Alterung belegt sind. Im Gegenteil gibt es gerade hinsichtlich der Alterung Belege für eine sehr gute Alterungsbeständigkeit, was auch an der UV-Transparenz liegt. Auch für die Festigkeit gibt es gegenteilige Hinweise; zumindest für den in Biaxversuchen gut beobachtbaren ersten Knickpunkt zeigt sich, dass er bei biaxialen Spannungszuständen höher liegt als bei monoaxialen Spannungszuständen [8].

Tab. 2 lässt außerdem erahnen, dass prCEN/TS 19102 eine Wassersackbildung nicht grundsätzlich ausschließt. Eine Sackbildung wird als akzeptabel bewertet, wenn eine Begrenzung des Schnee- oder Wassersacks nachgewiesen oder durch tragende Elemente in der Ausdehnung begrenzt wird, z.B. durch zusätzliche Seilunterstützung, die bei Sackbildung anspringt.

Darüber hinaus ist für den Nachweis von Schweißnähten noch ein Modifikationsfaktor $k_{\rm QL}$ anzusetzen. Dieser berücksichtigt den durch Überwachung nachgewiesenen

Tab. 3 Qualitätsabhängige Modifikationswerte *k*_{QL} für den Nachweis von Schweißnähten im GZT

Quality dependent modification factors *ker*, for the varification of

Quality dependent modification factors $k_{\rm QL}$ for the verification of weld seams in the ULS

Qualitätslevel QL	$k_{ m QL}$
3 (hohe Ansprüche)	1,0
2 (mittlere Ansprüche)	1,15
1 (niedrige Ansprüche)	1,3

Qualitätslevel des Konfektionärs. Drei Qualitätslevel sind vorgesehen, die direkt mit drei verschiedenen Überwachungsniveaus verknüpft sind. Der Qualitätslevel QL1 ist der Basislevel, bei dem das fertigende Personal sich selbst überwacht. Beim QL2 wird die Fertigung durch ein von der Fertigung unabhängiges Qualitätsmanagement überwacht und im höchsten Level QL3 wird der Konfektionär durch eine unabhängige externe Stelle fremdüberwacht. Die im aktuellen Entwurf vorgesehenen Werte für $k_{\rm OL}$ sind in Tab. 3 angegeben.

Die aus diesem Konzept resultierende nutzbare Festigkeit ist so hoch, dass ggf. mit plastischen Dehnungen zu rechnen ist. In vielen Folientragwerken sind plastische Dehnungen zunächst einmal nicht kritisch, bspw. in Folienkissen. Solange sie vom Tragwerksplaner kontrolliert werden können, können sie gezielt eingesetzt werden, um den Einsatz der Folien ökonomischer zu gestalten. Bei Tragwerken aus viskoelastisch-plastischen Kunststofffolien wie bspw. ETFE-Folien sieht prCEN/TS 19102 daher für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) ein zweigleisiges Konzept vor, in dem entweder die Begrenzung der plastischen Dehnungen nachgewiesen oder vereinfacht und auf der sicheren Seite liegend ein elastischer Spannungsnachweis geführt wird.

Tab. 2 *k*-Faktoren in Bemessungssituationen des GZT, Werte bzw. Wertebereiche für die *k*-Faktoren *k*-factors in design situations of the ULS, values or ranges of values for *k*-factors

Ben	nessungssituation	$k_{\rm biax} = 1,0$	$k_{\rm age} = 1,0$	<i>k</i> _{dur,p} = 1,8	<i>k</i> _{dur,L} = 1,6	$k_{\text{dur,M}} = 1,4$	$k_{ m dur,S}=1,3$	$k_{\text{temp},0} = 0.95-1.0$	$k_{\text{temp,40}} = 1,2$	$k_{\text{temp},50} = 1,3-1,7$
1	Vorspannung	X	X	X						X
2	Zeitweise erhöhte Vorspannung	X	X		X					
3	Schnee > 1000 m Höhenlage	X	X		X			X		
4	Schnee ≤ 1000 m Höhenlage	X	X			X		X		
5	Wind	X	X							
6	Wind bei erhöhter Temperatur 40°C	X	X						x	
7	Wind bei erhöhter Temperatur 50°C	X	X							x
8	Wassersack	X	X				X			

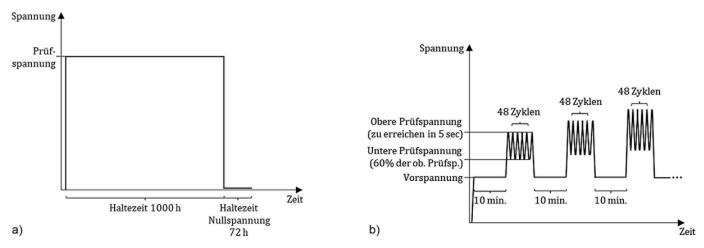


Bild 1 Lastprotokoll für biaxiale Zugversuche: Kriechversuche (a) und Hystereseversuche (b), zur Vereinfachung jeweils nur die Belastung in einer Materialrichtung dargestellt [4]

Load protocol for biaxial tension tests: creep tests (a) and biaxial hysterisis load tests (b), each simplified shown for only one material direction

2.3.2 GZG: Begrenzung von irreversiblen Dehnungen

Generell gelten für Folientragwerke die gleichen allgemeinen Regeln zu Verformungen, Wassersackbildung etc. wie für die textilen Membrantragwerke (Abschn. 2.2.2). Zusätzlich wird für die Folien ein Spannungsnachweis geführt, welcher im Folgenden erläutert wird.

Eine hohe Ausnutzung der Folien wird erreicht durch das Zulassen von irreversiblen Dehnungen in begrenztem Umfang. Die Grenze kann projektspezifisch festgelegt werden. Falls keine projektspezifische plastische Dehnungsgrenze definiert wird, wird eine maximale irreversible Dehnung von 1% vorgeschlagen. In jedem Fall ist darauf zu achten, dass die verwendeten Kunststofffolien nicht an andere Bauteile schlagen und somit beschädigt werden können.

Die auftretenden irreversiblen Dehnungen werden mithilfe biaxialer Zugversuche bestimmt, die lang anhaltende (Schnee-)Lasten oder zyklisch wirkende Windböen simulieren (Bild 1). Über diese Versuche werden die maximalen Dehnungen unter Belastung und v. a. bleibende Dehnungen nach Belastungen ermittelt. Aus den Messwerten können gemessenen irreversiblen Dehnungen Spannungsniveaus zugeordnet werden, die dann als Grenzspannung im Nachweis angesetzt werden. In den zyklischen Versuchen werden die Spannungen schrittweise erhöht, Verfestigungen und Versteifungen des Materials werden auf diese Weise genutzt (Bild 1b).

Der normative Anhang, in dem diese Versuche und deren Auswertung geregelt werden, sieht vor, dass entsprechende Versuchsergebnisse für drei verschiedene Temperaturen 0°C, 23°C und 50°C einmal je Folienprodukt vom Hersteller zur Verfügung gestellt werden. Dies stellt sicher, dass sie allen Planern zur Verfügung stehen. Mögliche Veränderungen im Laufe der anschließenden Produktion werden über regelmäßige monoaxiale Zugversuche detektiert. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen,

dass die Resultate der biaxialen Zugversuche signifikant zwischen verschiedenen Folienherstellern und Folienprodukten variieren können.

2.3.3 GZG: Bemessung im elastischen Bereich

Vereinfacht kann ein Nachweis im elastischen Bereich geführt werden. Dabei wird als Grenzspannung die Elastizitätsgrenze $f_{\rm el23}$ angesetzt. Diese kann aus biaxialen oder monoaxialen Zugversuchen bestimmt werden. In der Praxis werden die einfach durchzuführenden monoaxialen Zugversuche verwendet. Aus Versuchsserien mit mindestens fünf Probekörpern wird die Elastizitätsgrenze als 5%-Fraktilwert bestimmt. Liegen keine Versuchsergebnisse für die zu verwendende ETFE-Folie vor, wird der Ansatz $f_{\rm el23}=15$ MPa empfohlen. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass auch die Elastizitätsgrenze signifikant zwischen verschiedenen Folienherstellern und Folienprodukten variieren kann.

Bei langzeitig wirkenden Lasten wie Schnee oder über die Wintermonate erhöhten Innendruck in Kissenkonstruktionen muss beachtet werden, dass Kriechdehnungen trotz des "elastischen" Nachweises auftreten können.

Auch im GZG müssen physikalisch bedingte Modifikationen des Festigkeitswerts (durch erhöhte Temperatur etc.) berücksichtigt werden. Während dies in den oben beschriebenen biaxialen Versuchsprogrammen implizit enthalten ist, geschieht dies im elastischen Nachweis wieder mit Modifikationsfaktoren. Diese sind nicht notwendigerweise identisch mit denen im GZT, sowohl hinsichtlich der Werte als auch der Tatsache, dass zum Teil andere Faktoren anzusetzen sind. So findet der Wert $k_{\rm QL}$ hier keine Anwendung, da die Elastizitätsgrenze eine Eigenschaft des Grundmaterials und damit vom Qualitätslevel des Konfektionärs unabhängig ist. Dafür ist aber bei einlagigen Folienstrukturen ein zusätzlicher Faktor $k_{\rm single}=1,1$ zu berücksichtigen. Der Modifika-

Tab. 3 *k*-Faktoren in Bemessungssituationen des GZG, Werte bzw. Wertebereiche für die *k*-Faktoren *k*-factors in design situations of the SLS, values or ranges of values for *k*-factors

Bemessungssituation											4,1
		$k_{\rm biax} = 1,0$	$k_{\rm age} = 1,0$	$k_{\text{single}} = 1.1$	$k_{\mathrm{dur,p}} = 1.8$	$k_{\mathrm{dur,L}} = 1,6$	$k_{\mathrm{dur,M}}=1,4$	$k_{\mathrm{dur,S}} = 1,3$	$k_{\text{temp},0}=0.8$	$k_{\text{temp},40} = 1,2$	$ extbf{\emph{k}}_{ ext{temp},50} = 1,21$
1	Vorspannung	х	х		х						Х
2	Zeitweise erhöhte Vorspannung	x	x			x					
3	Schnee > 1000 m Höhenlage	x	x	(x)		X			X		
4	Schnee ≤ 1000 m Höhenlage	x	x	(x)			x		X		
5	Wind	x	x	(x)							
6	Wind bei erhöhter Temperatur 40°C	x	x	(x)						X	
7	Wind bei erhöhter Temperatur 50°C	x	x	(x)							X
8	Wassersack	x	x	(x)				X			

⁽⁾ deuten an, dass dieser Wert nur bei einlagigen, mechanisch vorgespannten Folienstrukturen anzuwenden ist

tionsfaktor dient v. a. der Vermeidung signifikanter plastischer Verformungen und damit einhergehender Vorspannungsverluste von einlagigen, mechanisch vorgespannten Konstruktionen. Er ist auf alle Bemessungssituationen anzuwenden, die zu signifikanten irreversiblen Dehnungen führen könnten, namentlich Schnee, Wind und Wassersack. Er ist nicht auf Vorspannungen anzuwenden, da ggf. hohe Anfangsvorspannungen durch Relaxation ausgeglichen werden. Aufgrund der auftretenden Relaxationsprozesse wird eine maximale Vorspannung von 7,5 MPa empfohlen. Tab. 3 fasst die k-Werte für den GZG zusammen.

3 Ausführung von Membrantragwerken

3.1 Allgemeines

prCEN/TS 19102 ist eine Bemessungsnorm. Da im Membranbau viele für die Nachweise erforderliche Festigkeitswerte projektspezifisch experimentell ermittelt werden müssen, lag es nahe, gleichzeitig auch Ausführungsregeln zu entwickeln. Nach intensiven und kontroversen Diskussionen in den europäischen und nationalen Gremien liegt nun ein erster Entwurf für einen Minimalstandard für die Ausführung vor. Diese Regeln sollen zunächst in einem nur informativen Anhang Teil der Bemessungsnorm sein und als Grundlage für eine weitere Schärfung dienen. Die entwickelten Regeln sind dabei eng auf die Bemessungskonzepte für Textil- und Folientragwerke abgestimmt.

Ziel ist es, das Regelwerk für die Ausführung spätestens bei der Überführung der CEN/TS 19102 in einen Eurocode in eine eigenständige Ausführungsnorm auszugliedern.

Der vorliegende Beitrag fokussiert auf das besonders strittige Thema der Überwachung der Hersteller und blendet die zahlreichen weiteren, weniger umstrittenen Regeln zur Herstellung von Membrantragwerken aus Platzgründen aus.

Grundlage für die Überwachungsregeln ist eine Einteilung in drei Qualitätslevel, die wiederum mit drei Ausführungsklassen nach DIN EN 1990 verknüpft sind. Tab. 4 zeigt die verschiedenen Niveaus und Zusammenhänge. Das Grundprinzip besteht darin, dass je höher die Ausführungsklasse und die damit verbundenen Konsequenzen im Falle eines Tragwerksversagens sind, desto höher sind die Überwachungsanforderungen an die Hersteller. Dies sichert bei komplexen und/ oder sehr großflächigen Tragstrukturen die erforderliche Produktionsqualität und damit Verlässlichkeit des Tragwerks. Auf der anderen Seite ermöglicht dieses Konzept Firmen, die auf kleinere und/oder weniger komplexe Strukturen spezialisiert sind, sich - gerechtfertigterweise - nicht den gleich hohen Anforderungen stellen zu müssen, wie solche, die z.B. auch hochkomplexe Großstrukturen bedienen möchten. Es ermöglicht außerdem neuen Firmen einen leichteren Marktzutritt.

Grundsätzlich müssen sowohl die Materialhersteller (Textilhersteller, Beschichter, Folienhersteller) als auch die Konfektionäre eine kontinuierliche werkeigene Produktionskontrolle einführen und aufrechterhalten. Dies beinhaltet verschriftlichte Verfahren, regelmäßige Inspektionen, Prüfungen und Bewertungen und die Nutzung der Resultate zur Kontrolle der Ausrüstung, der Produktionsprozesse und der hergestellten Membranpaneele. Die Produktionskontrolle soll sich stützen auf:

Tab. 4 Zusammenhang zwischen Ausführungsklassen und erforderlichen Qualitätsniveaus der Konfektionäre

Relationship between execution classes and required quality levels of manufacturers

Ausführungs- klasse	Erforderliches Qualitätsniveau des Konfektionärs	Beispiele für Bauwerke
EXC3	QL3	Tribünen, Konzerthallen, öffentliche Gebäude etc. mit hohen Versagens- folgen
EXC2	QL2	Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude etc. mit mittleren Versagensfolgen
EXC1	QL1	Landwirtschaftliche Nutzgebäude, Lager- gebäude, Gewächshäuser etc., die Menschen nicht regelmäßig betreten

- Wareneingangskontrollen,
- Kontrolle der Prozesse,
- Kalibrierung der Prüfeinrichtungen,
- Prüfungen der gefertigten Produkte,
- Nachverfolgbarkeit.

Darüber hinaus müssen die Konfektionäre vor dem Produktionsbeginn in Eignungsprüfungen den experimentellen Nachweis ausreichender Tragfähigkeiten der ausgeführten Verbindungen (Flächennähte, Randdetails) liefern. Dies wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

3.2 Kontinuierliche Produktionskontrolle der Materialhersteller

Für die Materialhersteller gibt es keine Unterscheidung in verschiedene Qualitätsniveaus. Zum Zeitpunkt der Materialherstellung ist dem Hersteller oft nicht bekannt, wofür sein Material später eingesetzt wird. Daraus ergibt sich konsequenterweise, dass die Qualität stets höchsten Anforderungen genügen muss.

3.3 Eignungsprüfungen von Membranpaneelen

Eignungsprüfungen sind an Flächennähten und an Randdetails auszuführen. Sie müssen einmalig für eine bestimmte Verbindungskonfiguration durchgeführt werden. Eine Verbindungskonfiguration ergibt sich aus Membranmaterial, Nahtbreite, Randprofilgeometrie und -material, Kederdurchmesser und -material etc.

Besonders bei Randdetails gilt: sie sollen "wie im Bauwerk ausgeführt" geprüft werden, d.h. mit dem Randprofil, der Kederschnur etc., die im Projekt zur Ausführung kommen sollen. Damit kann der maßgebende Versagens-

modus bestimmt und die Tragfähigkeit ermittelt werden. Das Randprofil darf allerdings auch verstärkt werden, damit tatsächlich nur die Membrane/Folie und der Keder geprüft werden, da das Randprofil sowieso separat nachgewiesen wird.

Teilsicherheitsbeiwerte sollen im Tragfähigkeitsnachweis entsprechend dem Versagensmodus angesetzt werden. Das bedeutet, je nachdem, ob Metallbauteile (z. B. Aufbiegen des Randprofils) oder Membran- bzw. Kunststoffbauteile versagen (z. B. Riss an der Nahtkante, Zusammenquetschen und Herausrutschen der Kederschnur), sollen Teilsicherheitsbeiwerte für Metallbauteile nach DIN EN 1993 [9] oder DIN EN 1999 [10] oder für Membranbauteile nach prCEN/TS 19102 (ggf. zuzüglich Modifikationsfaktoren) angesetzt werden. Bei Versagen in Kombination von Metall- und Membranbauteilen (z. B. Herausrutschen der Kederschnur infolge Zusammenquetschung der Kederschnur und Aufbiegen des Randprofils) soll der höhere Teilsicherheitsbeiwert für Membrane nach prCEN/TS 19102 angesetzt werden.

Eignungsprüfungen sollen nach prCEN/TS 19102, "wenn im Projekt erforderlich", auch bei erhöhten Temperaturen durchgeführt werden. Aus Sicht der Autoren ist die Berücksichtigung erhöhter Temperaturen sicherlich für die meisten Projektregionen der Welt erforderlich. Standardmäßig wird hierbei für textile Strukturen von $T=70\,^{\circ}\mathrm{C}$ und für ETFE-Folienprojekte von $T=50\,^{\circ}\mathrm{C}$ ausgegangen. Untersuchungen haben in der Vergangenheit gezeigt, dass diese Temperaturen die höchsten Werte widerspiegeln, die sich bei voller Sonneneinstrahlung bei den verschiedenen Materialien einstellen können. Je nach Projektregion und Materialfarbe können auch weniger hohe Temperaturen Sommerbedingungen adäquat abdecken.

Es ist vorgesehen, dass Eignungsprüfungen von hausinternen oder externen Prüflaboratorien durchgeführt werden können. Das Prüflabor sollte allerdings nach DIN EN ISO/IEC 17025 [11] akkreditiert sein und die zu verwendende Prüfnorm (DIN EN ISO 1421 [12], DIN EN ISO 13934-1 [13] oder DIN EN ISO 527-3 [14]) sollte in der Liste der akkreditierten Normen enthalten sein.

3.4 Kontinuierliche Produktionskontrolle der Konfektionäre

Für die Konfektionäre gilt: Je nach erforderlichem Qualitätsniveau in einem Projekt sind unterschiedlich strenge Maßnahmen zur Überwachung der Produktion vorgesehen (Tab. 5). Beim rudimentären QL1 überwacht die Produktion sich selbst. Dies kann mithilfe von Prüfmaschinen geschehen, aber auch durch visuelle Prüfungen und durch manuelle Aufschälprüfungen durchgeführt werden. Die Überwachung beinhaltet außerdem Inspektionen der Produktionsstätte, der Maschinen, der Lagereinrichtungen, der Prüfmittel, der Dokumentation usw. In QL2 und QL3 werden die Produktprüfungen "direkt" – gemeint sind

Tab. 5 Mindestanforderungen an die Produktionsüberwachung der Konfektionäre

Minimum requirements of production control of manufacturers

Erforderliches Qualitätsniveau des Konfektionärs	Mindestanforderungen an die Produktionsüberwachung
QL3	wie in QL2 zuzüglich projektspezifische Fremdüberwachung
QL2	Überwachung durch einen von der Produktion unabhängigen autorisierten Repräsentanten des Konfektionärs
QL1	Selbstüberwachung

Prüfungen an einer Zugprüfmaschine – oder "indirekt" – gemeint sind Prüfungen z.B. der Produktionsparameter oder Aufschälprüfungen – durchgeführt. Diese werden dann von jemandem unabhängig von der Produktion verantwortet, z.B. von einem Qualitätsmanager. Die zusätzliche Fremdüberwachung in QL3 ist für jedes Projekt durchzuführen, allerdings nicht häufiger als zwei Mal pro Jahr.

Im Gegensatz zur Eignungsprüfung wird bei der kontinuierlichen Produktprüfung nur noch die Festigkeit der Naht kontrolliert. Dies bedeutet, dass der Versuchsaufbau für Randdetails vereinfacht werden kann, indem bspw. ein projektunabhängiges, ausreichend steifes Standardkederprofil zusammen mit einem Stahlkeder genutzt wird, welches Bruch an der Naht sicherstellt. Grundsätzliches Ziel ist es dabei, die Festigkeiten aus der Eignungsprüfung zu bestätigen.

Versuche sind nur bei Raumtemperatur T = 23 °C erforderlich, können also von den Konfektionären – die in der Regel keine Temperierkammern an ihren Prüfmaschinen

betreiben – selbst durchgeführt werden. Wenn die Nahtfestigkeiten bei Raumtemperatur ausreichend sind, lässt das auch die Bestätigung der Festigkeiten bei erhöhter Temperatur zu. Falls keine eigene Prüfmaschine vorhanden ist, können die Prüfungen externen Laboren übergeben werden. Im Rahmen der kontinuierlichen Produktionskontrollen werden an die internen oder externen Labore keine speziellen Kompetenzanforderungen gestellt; eine regelmäßige Kalibrierung der Prüfmaschinen wird vorausgesetzt.

In den Qualitätsniveaus 2 und 3 müssen die Produktionskontrollen dokumentiert und aufgezeichnet und für mindestens zehn Jahre verwahrt werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag stellt den aktuellen Entwicklungsstand der ersten europäischen Bemessungsnorm für Membrantragwerke vor, der in Form der prCEN/TS 19102 "Design of tensioned membrane structures" als Normentwurf vorliegt. Neben dem Kernanliegen der Norm, der Bemessung, wurden gleichzeitig auch zum Bemessungskonzept passende Ausführungsregeln erarbeitet, die übergangsweise in einem informativen Anhang zur Bemessungsnorm gehören werden. Neben den wesentlichen Bemessungsregeln stellt der Beitrag ausschnittsweise die kontrovers diskutierten Ausführungsregeln zur Überwachung der Hersteller vor.

Die Normentwicklung ist in die finale Phase eingetreten. Der hier vorgestellte Normentwurf wird nun übersetzt und dann den nationalen Spiegelausschüssen vorgelegt. Anschließend wird der Normentwurf veröffentlicht, um von der Fachöffentlichkeit kommentiert zu werden.

Literatur

- Stranghöner, N.; Uhlemann, J.; Mollaert, M.; Gosling, P. (2014) The Development of a Eurocode "Tensile Membrane Structures". Proceedings of the 37th IABSE International Symposium, Madrid, Spain, Sep. 3–5, 2014, pp. 1572–1578.
- [2] Stranghöner, N.; Uhlemann, J. (2016) Aktueller Stand der Normungsarbeit im Membranbau in: Stranghöner, N.; Saxe, K.; Uhlemann, J. [Hrsg.] 3. Essener Membranbau Symposium. Aachen, 30. Sept. 2016. Aachen: Shaker Verlag.
- [3] Stranghöner, N.; Uhlemann, J.; Maywald, C.; Stimpfle, B. (2020) Materialprüfung und Bemessung im Zelt- und Membranbau in: Kuhlmann, U. [Hrsg.] Stahlbau-Kalender 2020. Berlin: Ernst & Sohn, S. 455–509.
- [4] prCEN/TS 19102:2021-11 (2021) Design of tensioned membrane structures. Final Draft submitted to NEN (unveröffentlicht).
- [5] DIN EN 1990:2010-12 (2010) Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010. Berlin: Beuth. Ausgabe Dez. 2010.
- [6] DIN EN 17117-2:2021-09 (2021) Mit Kautschuk oder Kunststoff beschichtete Textilien – Mechanische Prüfver-

- fahren unter biaxialen Spannungszuständen Teil 2: Bestimmung der Kompensationswerte; Deutsche Fassung EN 17117-2:2021. Berlin: Beuth. Ausgabe Sept. 2021.
- [7] Gibson, N. D. (2015) *How to get a membrane structure off the drawing board*. Steel Construction 8, No. 4, pp. 244–250. https://doi.org/10.1002/stco.201510034
- [8] Surholt, F.; Runge, D.; Uhlemann, J.; Stranghöner, N. (2022) Mechanisch-technologisches Verhalten von ETFE-Folien und deren Schweißverbindungen. Stahlbau 91, H. 8, S. 513–523. https://doi.org/10.1002/stab.202200039
- [9] DIN EN 1993:2010-12 (2010) Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009. Berlin: Beuth. Ausgabe Dez. 2010.
- [10] DIN EN 1999:2010-05 (2010) Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln; Deutsche Fassung EN 1999-1-1:2007 + A1:2009. Berlin: Beuth. Ausgabe Mai 2010.
- [11] DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03 (2018) Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlabora-

- torien (ISO/IEC 17025:2017); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2017. Berlin: Beuth. Ausgabe März 2018.
- [12] DIN EN ISO 1421:2017-03 (2017) Mit Kautschuk oder Kunststoff beschichtete Textilien – Bestimmung der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung (ISO 1421:2016); Deutsche Fassung EN ISO 1421:2016. Berlin: Beuth. Ausgabe März 2017.

Autorin und Autoren

Dr.-Ing. Jörg Uhlemann (Korrespondenzautor) joerg.uhlemann@uni-due.de
Universität Duisburg-Essen
Institut für Metall- und Leichtbau
Universitätsstraße 15
45141 Essen

Dipl.-Ing. Bernd Stimpfle bernd.stimpfle@form-tl.de formTL ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh Kesselhaus | Güttinger Straße 37 78315 Radolfzell

- [13] DIN EN ISO 13934-1:2013-08 (2013) Textilien Zugeigenschaften von textilen Flächengebilden Teil 1: Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraft-Dehnung mit dem Streifen-Zugversuch (ISO 13934-1:2013); Deutsche Fassung EN ISO 13934-1:2013. Berlin: Beuth. Ausgabe Aug. 2013.
- [14] DIN EN ISO 527-3:2019-02 (2019) Kunststoffe Bestimmung der Zugeigenschaften Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln (ISO 527-3:2018); Deutsche Fassung EN ISO 527-3:2018. Berlin: Beuth. Ausgabe Feb. 2019.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner natalie.stranghoener@uni-due.de Universität Duisburg-Essen Institut für Metall- und Leichtbau Universitätsstraße 15 45141 Essen

Zitieren Sie diesen Beitrag

Uhlemann, J.; Stimpfle, B.; Stranghöner, N. (2022) *Bemessung und Ausführung von Membrantragwerken nach prCEN/TS 19102*. Stahlbau 91, H. 8, S. 504–512. https://doi.org/10.1002/stab.202200036

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 28. April 2022; angenommen: 3. Juni 2022.

Bernd Stimpfle Sonderdruck

PumpltUp – gite mobile für die Kulturhauptstadt Esch-sur-Alzette 2022

Der Wanderweg des Minette Trail verbindet im Rahmen der europäischen Kulturhauptstadt Esch2022 elf bedeutende Orte im Süden Luxemburgs. Entlang dieser Route entstanden elf außergewöhnliche Herbergen. Dieser Beitrag beschreibt das pneumatische Projekt PumpltUp von der Entwurfsphase bis zur Ausführung und Montage.

Stichworte PVC-folie; Membrane; Polyesterseile; pneumatische Konstruktion; fliegender Bau

1 Einleitung

Esch-sur-Alzette in Luxemburg ist Kulturhauptstadt 2022, gemeinsam mit Novi Sad in Serbien und Kaunas in Litauen. Unter dem Motto "Remix Culture" will die Stadt den kulturellen Mix der Region präsentieren und außerdem die alte Industriekultur mit Neuem verbinden.

Eines der Projekte für Esch 2022 ist der Minette Trail, ein etwa 90 km langer Wanderweg im Süden Luxemburgs durch die ehemalige Industrieregion, die durch den roten erzhaltigen Boden gekennzeichnet ist. Als Übernachtungsmöglichkeit für die mehrtägige Wanderung wurden elf Kabaisercher von verschiedenen Architektenteams geplant.

Eine dieser Herbergen ist die gite mobile PumpItUp. Es handelt sich hierbei um eine pneumatische mobile Unterkunft. Die pneumatische Hülle befindet sich auf einem Anhänger mit zwei klappbaren Flügeln. Die Unterkunft wird mehrfach auf- und abgebaut, an unterschiedlichen Standorten.

2 Projektbeschreibung

Die pneumatische Hülle bildet eine Kugelform aus zwei Lagen Membranen. Beide Lagen bestehen aus transparenter PVC-Folie. Um für die Übernachtungsgäste Privatsphäre zu erhalten, besteht die innere Lage bis zu einer Höhe von 2,3 m über Plattformniveau aus transluzentem Material.

Die äußere und innere Hülle werden punktuell mit Kunstfaserseilen gekoppelt. Der Anschluss an die Plattform erfolgt mit Reißverschlüssen und Aluminium-Klemmleisten am umlaufenden Rand.

PumpltUp, gite mobile for the European cultural capital Esch-sur-Alzette 2022

The Minette trail connects eleven charming places in the south of Luxembourg as part of the Capital of Culture Esch-sur-Alzette 2022. Along this route eleven exceptional accommodations were built. This paper describes the pneumatic project PumpltUp from design up to execution and installation.

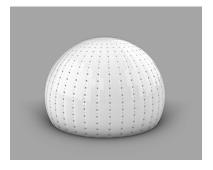
Keywords PVC-foil; membrane; polyester-ropes; pneumatic structure; temporary structure

3 Entwurf

Ausgehend vom Wettbewerbsentwurf der Architekten wurde eine pneumatische Form entwickelt. Innendruck und Vorspannung der beiden Membranlagen bilden hierbei ein Gleichgewicht. Durch die Vorspannung entsteht in der zweilagigen Hülle eine leichte Biegesteifigkeit für den Abtrag der äußeren Lasten.

Um die erforderliche Steifigkeit zu erzielen, entstand eine gegenüber dem Wettbewerbsentwurf (Bild 2) deutlich dickere Wand. Aus der Wandstärke mit 300 mm wurden etwa 1000 mm (Bild 3). Durch den steilen Anstieg an der Innenwand schränkt dies die Nutzung nicht ein.

Zur Ermittlung der Verbindungspunkte wurden zwei Ansätze untersucht (Bild 1). Im ersten Ansatz werden die beiden Hüllenteile in radialen Schnitten gekoppelt. Nachteil hiervon ist, dass die Dichte der Seile zum Zenit hin zunimmt. Deshalb wurde als zweite Variante das Bildungsprinzip der geodätischen Kuppel angewandt. Hierzu wird die Kuppel in dreiecksförmige Großsegmente unterteilt, die dann jeweils in 36 kleinere Dreiecke unterteilt werden. Die Seilverbindungen schließen an den Ecken der kleinen Dreiecke an. So entsteht eine harmo-





iild 1 Radiale Verbindungen und geodätische Kuppel Radial connections and geodetic dome

ielle: formTL

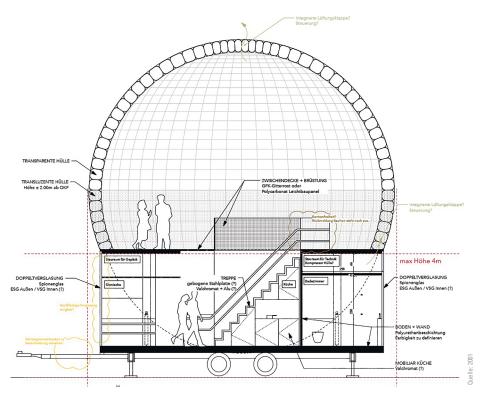


Bild 2 Schnitt des Wettbewerbsentwurfs Section through the competition design

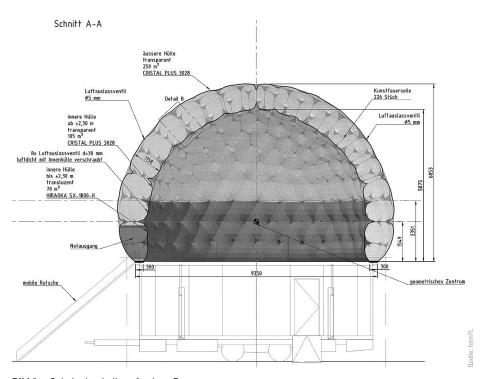


Bild 3 Schnitt durch die gefundene Form Section through the formfinding shape

nische Form mit gleichmäßiger Verteilung der Verbindungspunkte.

4 Berechnung

Zur Berechnung wurden die Programme von Professor Mike Barnes verwendet. TLform für die Formfindung und TLload für die statische Berechnung. Die Programme rechnen nach der Methode der dynamischen Relaxation [1] und berücksichtigen die Besonderheiten von Membran-, Folien- und Seilkonstruktionen. Dies sind, um einige Beispiele zu nennen, die Formfindung, orthotropes Materialverhalten (Längs- und Querrichtung) sowie große Verformungen.

Das Rechenmodell (Bild 4) wird durch Seilelemente sowie dreieckige Membranelemente diskretisiert. Es wird

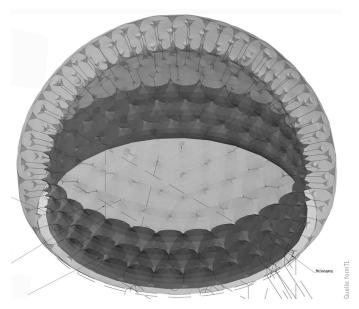


Bild 4 Isometrie des Rechenmodells Isometric view numerical model

Draufsicht

| Viridast/Virid load w ||Al/nir||
| 0.259
| 0.501
| 0.259
| 0.012
| 0.111
| 0.238
| 0.331
| 0.240
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400
| 0.400

Bild 5 Angesetzte Windlastverteilung
Applied wind load distribution

unter Berücksichtigung der Längenänderung der Elemente sowie der Verformung des Gesamtsystems geometrisch exakt gerechnet. Das Gleichgewicht wird am verformten System ermittelt.

Die gite mobile ist ein fliegender Bau nach EN 13782 [2]. Gemäß Luxemburger nationalem Anwendungsdokument für den Eurocode 1 1–4 [3] beträgt die Bemessungswindgeschwindigkeit 24 m/s, somit darf die Windlasttabelle aus EN 13782 angewendet werden. Schneelast wurde nicht berücksichtigt, da eine Winteraufstellung nicht vorgesehen ist.

Die Verteilung der Windlast über die Kugeloberfläche erfolgt nach EN 1994-1-4 [4] für eine Halbkugel (Bilder 5, 6).

Da die Biegesteifigkeit der Hülle nicht sehr hoch ist, reagiert sie auf Winddruck mit einer deutlichen Verformung nach innen (Bild 7). Die Standsicherheit unter Bemessungswind ist hierbei aber nicht eingeschränkt.

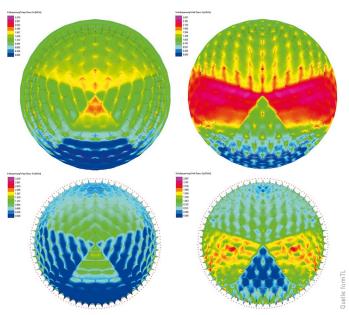


Bild 6 Spannung in der Außen- und Innenhülle voller Windlast Stress in the outer and inner envelope under full wind load

5 Luftversorgung

Den Innendruck von 1000 Pa erzeugt die pneumatische Vorspannung. Eine zentrale Stützluftanlage stellt diesen Druck bereit. Die Gebläseeinheit ist eine Sonderanfertigung. Stützluftgebläse und Trockner sind in zwei getrennten Gehäusen untergebracht und im Chassis des Anhängers eingebaut (Bild 8). Die beiden Einheiten sind durch ein Verbindungsrohr gekoppelt. Über ein Steigrohr erfolgt die Stützluftversorgung in einer Ecke des Anhängers.

Um die Dauerlast in der Folie zu minimieren, wurde der ursprünglich vorgesehene Regeldruck von 1500 Pa auf 1000 Pa reduziert, da die Berechnung ausreichende Formstabilität auch bei geringerem Druck gezeigt hat.

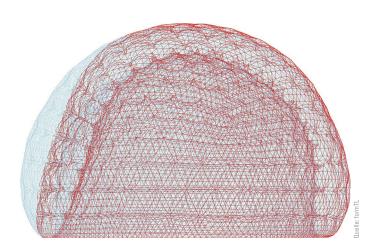


Bild 7 Verformung unter vollem Wind
Deformation under maximum wind

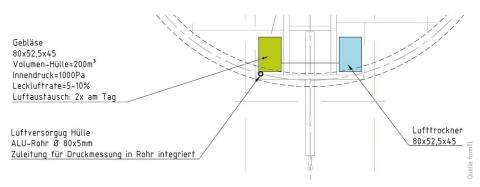


Bild 8 Integration der Gebläseeinheit ins Chassis
Integration of the blower unit in the chassis

Auf einen ursprünglich geplanten Windmesser zur Steuerung des Innendrucks konnte deshalb verzichtet werden.

6 Detaillierung

Die Koppelung der beiden Membranseiten erfolgt durch Polyesterseile. Polycarbonatscheiben mit Schlossschrauben und Ösenmuttern sind in die Membrane eingeschweißt, an denen die Seile mit kleinen Karabinern angeschlossen werden (Bild 9).

Dieses Knotendetail wurde in einem Belastungstest (Bild 10) überprüft. Bei 1,5 kN Belastung, was der maximalen Last im Projekt entspricht, hat sich eine Form eingestellt, die hinreichend genau der Formfindungsberech-

nung entspricht. Das Versagen des Knotendetails trat dann mit deutlicher Plastifizierung bei einer Kraft von mehr als 8 kN ein.

Der Anschluss an die Plattform erfolgt mit Klemmleisten entlang des Plattformrands. Kederstreifen mit angeschweißten Reißverschlüssen erlauben eine schnelle Montage und Demontage. Die pneumatische Konstruktion ist dichtgeschweißt und die Reißverschlüsse sind außen aufgeschweißt, sodass hierfür keine Luftdichtigkeit erforderlich ist.

In einer Ecke des Anhängers endet das 80-mm-Luftversorgungsrohr zwischen den beiden Klemmlinien über Plattformniveau. Die Membrane hat an dieser Stelle eine Öffnung mit 70 mm Durchmesser. Bei der Montage wird

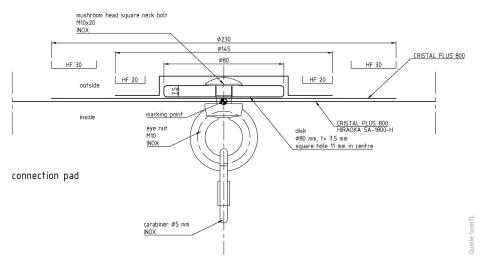


Bild 9 Anschluss Seile Connection for the ropes



Bild 10 Knotentest bei den Laststufen 1,5 kN und 4,5 kN Nodal test in the load steps 1.5 kN and 4.5 kN

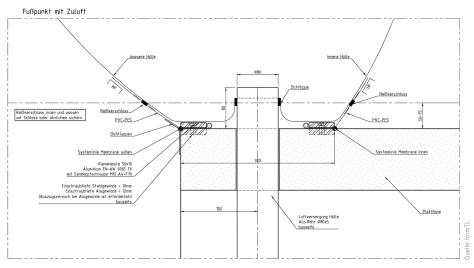


Bild 11 Anschluss an die Plattform Connection of he platform

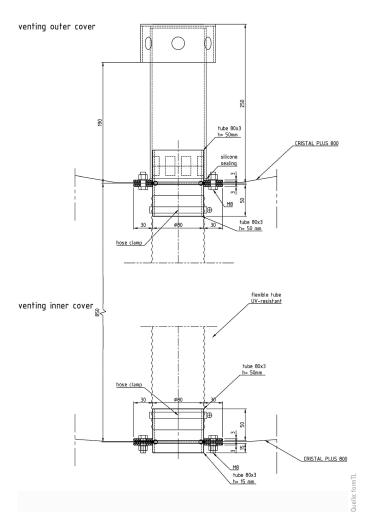


Bild 12 Zenitlüfter
Zenit ventilation

die Membrane über das Rohr gestülpt und schließt somit dicht ab (Bild 11).

Um eine natürliche Durchlüftung des Innenraums zu erreichen, sind in der Plattform Lufteinlässe integriert und im Zenit der Hülle sitzt eine Entlüftungsöffnung (Bild 12). Mit Klemmanschlüssen in der Hülle verbindet ein flexib-

les Rohr den Innenraum mit dem Außenraum. Auf der Außenseite sitzt ein längeres Rohr mit Abdeckhaube, durch das die warme Luft entströmen kann.

7 Zuschnitt

Die Form der Hülle ist lokal stark gekrümmt, was für das Schweißen zu einem sehr hohen Aufwand führen würde. Für einen optimalen Fertigungsprozess wurde die Zuschnittsform als ausgemittelte Fläche generiert, mit annähernd identischer Gesamtoberfläche (Bild 13).

Eine Vergleichsberechnung mit der verebneten Form unter Innendruck hat wieder zu der ursprünglichen Membrangeometrie geführt, was die Machbarkeit dieser Zuschnittsmethode bestätigt hat.

Diese Zuschnittsform wurde an den Hauptkanten der geodätischen Kuppel geteilt und dann horizontal zugeschnitten. Die Zuschnitte enthalten außerdem die Lage der Anschlusspunkte für die Seile (Bild 14).

Die Kompensation wurde anhand von Biaxialversuchen festgelegt. In der Außenhülle beträgt sie 4% in beide Richtungen. In der Innenhülle beträgt sie 4% für die Folie und 0% in Kettrichtung sowie 1% in Schussrichtung für das transluzente Membranmaterial. An den Übergängen wurde die Kettkompensation ausgeglichen, um gleiche Nahtlängen zu erreichen.

Die Biaxialversuche und deren Auswertung sind in Anlehnung an EN 17117-2 [5] erfolgt, basierend auf dem projektspezifischen Spannungsniveau.

8 Fertigung

Die PVC-Folie und das PVC-beschichtete Polyestergewebe werden mit HF-Schweißnähten verbunden (Bild 15). In einem ersten Schritt werden die Teilsegmente gefertigt

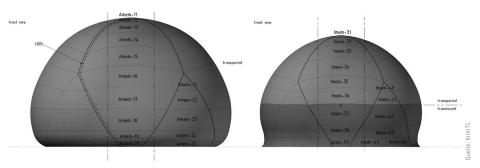


Bild 13 Geglättete Zuschnittsmodelle außen und innen Smooth patterning model outside and inside

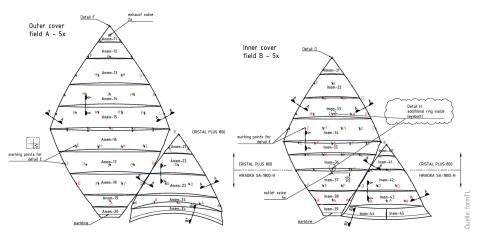


Bild 14 Membran- und Folienzuschnitte Membrane and foil pattern



Bild 15 Schweißen der Verbindungsnähte Welding of the connection seams



Bild 16 Geschweißter Punkthalter mit angeschlossenem Verbindungsseil Welded nodal connector with connected rope

und anschließend zusammengesetzt. Für die Punkthalter wurden spezielle Rundelektroden gefertigt (Bild 16).

Die PVC-Folie ist aufgrund ihrer Dicke sehr starr, auch rutschen die Lagen nur schwer aufeinander, weshalb für das Bewegen der Hülle mit zunehmender Gesamtfläche sehr viel Personal nötig war.

9 Montage

Ende Dezember 2021, direkt nach Fertigstellung der Hülle, ist ein Probeaufbau erfolgt, um das Aufblasen und das

Falten der Membrane zu testen. Hierzu wurde in der Halle die pneumatische Konstruktion ausgelegt und aufgeblasen.

Mit zunehmendem Innendruck hat sich die Hülle aufgestellt. Die Außenhülle hat über die Verbindungsseile die Innenhülle mit angehoben.

Kurz vor Erreichen des Drucks von 1000 Pa war auch der Zenit komplett oben und die planmäßige Form hat sich eingestellt (Bild 17). Lehnt man sich von innen gegen die Wand, gibt die Konstruktion nur leicht nach. Personen innerhalb der Hülle können erst dann wahrgenommen werden, wenn sie sich an die Hüllenwand anlehnen (Bild 18).



Bild 17 Inneneindruck
Impression of the inside



Bild 18 Transluzente Hülle mit Person im Inneren Translucent envelope with person inside



Bild 19 Beginn des Aufblasens von oben Start of the inflation view from above

Die Endmontage des PumpItUp-Projekts fand in einer alten Industriehalle in Schifflingen statt. Das Fahrwerk kommt aus Belgien, die Karosserie aus Frankreich und die Hülle aus Italien. Hier erfolgte auch der Innenausbau durch verschiedene Handwerksbetriebe.



Bild 20 Die Hülle schiebt sich über den Rand The envelope exceeding the platform



Bild 21 Vollständig aufgeblasene Hülle Fully inflated envelope

Die umlaufenden Kederstreifen mit zugehöriger Reißverschlusshälfte wurden mit Klemmleisten entlang des Plattformrands befestigt.

Anschließend wurde die pneumatische Hülle mit einem Kran auf die Mitte der Plattform gesetzt. Die Hülle wurde dort ausgebreitet und umlaufend die Reißverschlüsse verbunden. Nachdem alle Anschlusslinien verbunden waren, konnten die Gebläse die Hülle unter Druck setzen (Bild 19). Wie schon im Probeaufbau in Italien gesehen, hat sich die Hülle langsam angehoben. Jedoch anders als auf dem Boden, hat sich die Hülle an den Rand geschoben und hing leicht nach unten (Bild 20). Die Außenhülle trägt aber bereits.

Mit zunehmendem Innendruck stellt sich die planmäßige Form ein und die gite mobile wird begehbar und erlebbar (Bilder 21, 22).



Bild 22 Innenraum Inner space

10 Zusammenfassung

Die mobile Herberge ist in einer interdisziplinären Zusammenarbeit entstanden. Es ist gleichermaßen ein Fahr-

zeug wie eine vollwertige Unterkunft. Die transparente Hülle überdacht die Schlafstätte für Wanderer und Wanderinnen. Tags und nachts ist der Blick in den Himmel frei, und dennoch bietet die Hülle einen geborgenen Raum zur Entspannung. Die Übernachtung wird zu einem ganz besonderen Erlebnis. Pünktlich zu Beginn der Sommersaison geht die gite mobile nun an den Start.

Projektdaten

Oberfläche Außenhülle: 251 m² Oberfläche Innenhülle: 168 m² Überdachte Grundfläche: 93 m² Folienmaterial: Cristal Plus 800 µm Membranmaterial: Hiraoka SA 1800 H

Projektbeteiligte

Auftraggeber: Administration Communale de Esch-sur-Alzette

Bauherr: Ville d'Esch-sur-Alzette

Architekten: 2001 territories, buildings, spaces & ideas, Esch-sur-Alzette, Luxemburg mit NJOY_

architecture inside, Luxemburg

Ausführung pneumatische

Hülle: Canobbio Textile Engineering srl, Castelnuovo-

Scrivia, Italien

Luftversorgung: Elnic, Rosenheim

Membran- und

Folienplanung: formTL ingenieure für tragwerk und leichtbau

GmbH, Radolfzell

Literatur

- [1] Barnes, M. R. (1999) Form finding and analysis of tension structures by dynamic relaxation. International Journal of Space Structures 14, No. 2, pp. 89–104. https://doi.org/10.1260/0266351991494722
- [2] EN 13782:2015 (2015) Temporary structure Tents Safety.
- [3] ILNAS-EN 1991-1-4:2005+A1:2010 AN-LU:2020 (2020) Eurocode 1: Actions sur les structures – Partie 1–4: Actions
- générales Actions du vent Annexe Nationale Luxembourgeoise
- [4] EN 1991-1-4:2005 + A1:2010 + AC:2010 (2010) Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions.
- [5] EN 17117-2:2021 (2021) Rubber- or plastics-coated fabrics
 Mechanical test methods under biaxial stress states Part
 2: Determination of the pattern compensation values.

Autor

Dipl.-Ing. Bernd Stimpfle (Korrespondenzautor) bernd.stimpfle@form-tl.de formTL ingenieure für tragwerk und leichtbau GmbH Güttinger Straße 37 78315 Radolfzell

Zitieren Sie diesen Beitrag

Stimpfle, B. (2022) PumpItUp – gite mobile für die Kulturhauptstadt Esch-sur-Alzette 2022. Stahlbau 91, H. 8, S. 524–531. https://doi.org/10.1002/stab.202200037